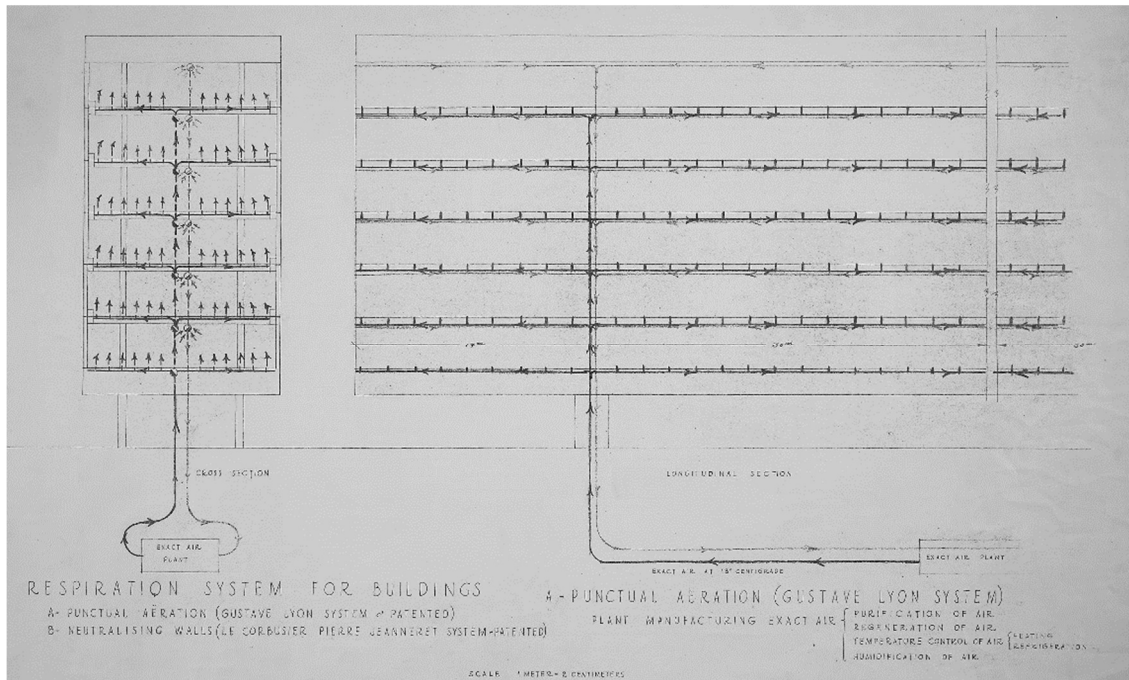


**MODELOS NUMÉRICOS DE EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE
LE CORBUSIER PARA EL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS:
EL MURO NEUTRALIZANTE Y LA RESPIRACIÓN EXACTA.
EL CASO DE LA CIUDAD DEL REFUGIO DE PARÍS.**



TESIS DOCTORAL

Sevilla, 2019

Cristina Ramírez Balas

Directores:

**Dr. Juan José Sendra Salas, Dr. Rafael Suárez Medina,
Dr. Enrique D. Fernández Nieto y Dra. Gladys Narbona Reina.**

Tutor:

Dr. Juan José Sendra Salas

**MODELOS NUMÉRICOS DE EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE
LE CORBUSIER PARA EL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS:
EL MURO NEUTRALIZANTE Y LA RESPIRACIÓN EXACTA.
EL CASO DE LA CIUDAD DEL REFUGIO DE PARÍS.**

Cristina Ramírez Balas

Sevilla, 2019

TESIS DOCTORAL

Directores:

Dr. Juan José Sendra Salas, Dr. Rafael Suárez Medina

Dr. Enrique D. Fernández Nieto y Dra. Gladys Narbona Reina

Tutor:

Dr. Juan José Sendra Salas

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París. Cristina Ramírez Balas. Sevilla, 2019.

Ilustración en portada: Esquema de funcionamiento de la respiración exacta y el muro neutralizante. (Dibujo de Le Corbusier, FLC 15720).

Tesis doctoral elaborada en el seno del grupo PAIDI TEP-130. *Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía*, adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, junto con el Departamento de Matemática Aplicada I de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla.



*A mi hijo,
fuente de felicidad.*

Agradecimientos

A Juan José Sendra y Rafael Suárez, más que mis directores de tesis, mis instructores en el camino de la investigación, por enseñarme la exactitud y rigurosidad de la visión intelectual. Por tanta generosidad, su tiempo, su rapidez en las continuas revisiones, y confiar en mí para desarrollar este trabajo.

A Enrique Fernández y Gladys Narbona, mis directores de tesis en la disciplina de las Matemáticas. Sin duda, pieza clave y esencial para la elaboración de esta tesis. Por aportar tanto conocimiento y programación para hacer posible y visible la construcción de los modelos energéticos desarrollados.

A mis hermanas, Almudena y Remedios, por transmitirme el coraje y la valentía para sacar fuerzas y lograr terminarlo.

A mis padres, Manuel y Antonia, por apoyarme en todas las decisiones de mi vida, y sobre todo, por ser mi mejor ejemplo de vida, y mi guía.

A Raúl, por ser el mejor compañero de vida que puedo tener, por el optimismo transmitido durante todo este tiempo. Gracias por el día a día.

Muchas gracias.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Índice

Resumen.....	7
1. Introducción	9
1.1. Justificación del estudio.....	9
1.2. Novedad de las propuestas de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios.	10
2. Estado general del arte sobre las fachadas activas de doble piel	19
3. Estructura de la tesis.....	23
4. Hipótesis y objetivos	27
4.1. Hipótesis	27
4.2. Objetivo general	27
4.3. Objetivos específicos.....	28
5. Metodología.....	29
5.1. Caso de Estudio	29
5.1. Propuesta y programa del edificio.....	29
5.2. Descripción del edificio	31
5.3. Cronología de los acontecimientos acaecidos en el edificio	36
5.2. Modelos numéricos.....	49
5.2.1. Propuesta de un modelo numérico simplificado: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (2D).....	50
5.2.1.1. Modelo acoplado para el problema de evolución de la temperatura interior (problema 2D)	50
5.2.1.2. Modelo del muro neutralizante (problema 1D).....	52
El muro neutralizante	52
Modelo matemático y aproximación numérica	53
Método radiante	54
Modelos numéricos	57
5.2.2 Propuesta de un modelo numérico complejo: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (3D).....	58
Modelo 3D CFD y modelo ATF	58
Modelo específico 3D.....	61
6. Propuestas innovadoras de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de edificio: Ciudad del Refugio en París	67
6.1. Resumen	67
6.2. Publicación	69
6.3. Discusión de resultados.....	75

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

6.3.1. El muro neutralizante y la respiración exacta en la Ciudad de Refugio de París.	
6.3.2. Simulación del comportamiento térmico.	75
6.3.2.1. Simulación del sistema ejecutado: <i>pan de verre</i> y respiración exacta.....	77
6.3.2.2. Simulaciones del sistema proyectado: muro neutralizante y respiración exacta.	78
7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain.....	81
7.1. Resumen	81
7.2. Publicación	83
7.3. Discusión de resultados	106
7.3.2. Aplicación del modelo numérico del muro neutralizante al caso de estudio	108
7.3.2.1. Simulaciones del modelo en invierno con ausencia y presencia de radiación solar	108
7.3.2.2. Simulaciones del modelo en verano	111
8. Modelo numérico simplificado del efecto combinado del muro neutralizante y respiración exacta	115
8.1. Resumen	115
8.2. Publicación	117
8.3. Discusión de resultados	132
8.3.1. Simulación del muro neutralizante (problema 1D)	132
8.3.2. Simulación de la respiración exacta (problema 2D)	133
8.3.3. Simulación del modelo acoplado 1D/2D	134
9. Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada activa transparente de doble piel y un sistema de ventilación mecánica.....	137
9.1. Resumen	137
9.2. Publicación	139
9.3. Discusión de resultados	158
8.3.1. Hipótesis 1: Propuesta de Le Corbusier.....	158
8.3.2. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente.....	163
10. Conclusiones	171
10.1 Idoneidad de la solución ejecutada: <i>pan de verre</i> y respiración exacta	171
10.2 Modelo numérico simplificado: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (2D)	172
10.3 Modelo numérico complejo: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (3D). Optimización energética.....	173
Epílogo.....	177
Bibliografía	179
Libros y capítulos de libro	179
Artículos científicos	180

Tesis doctorales	181
Textos normativos.....	182
Páginas web.....	182
Lista de figuras y tablas	183

Anexos

Vídeo 1:

Hipótesis 1. Propuesta de Le Corbusier en invierno.

..... (Correspondencia con la figura 76a del capítulo 9)

Vídeo 2:

Hipótesis 1. Propuesta de Le Corbusier en verano.

..... (Correspondencia con la figura 76b del capítulo 9)

Vídeo 3:

Hipótesis 2. Propuesta alternativa más eficiente energéticamente en invierno.

..... (Correspondencia con la figura 83a del capítulo 9)

Vídeo 4:

Hipótesis 2. Propuesta alternativa más eficiente energéticamente en verano sin *free cooling*.

..... (Correspondencia con la figura 83b del capítulo 9)

Vídeo 5:

Hipótesis 2. Propuesta alternativa más eficiente energéticamente en verano con *free cooling*.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Resumen

La obra de Le Corbusier ha sido ampliamente estudiada y ha sido una de las principales referencias de la Arquitectura del siglo XX. No obstante, una de sus obras, La Ciudad del Refugio de París (1929-1933), en la que se centra esta tesis, ha sido muy cuestionada, principalmente por la polémica generada por las quejas de los usuarios al personal del Ejército de la Salvación por la falta de confort térmico interior. En este edificio Le Corbusier propuso la combinación de dos innovadoras soluciones para el acondicionamiento ambiental de edificios que denominó como “muro neutralizante” y “respiración exacta”; la primera como sistema térmico integrado en una fachada vidriada de doble piel, y la segunda como sistema de ventilación para el control de la calidad de aire interior. Sin embargo, el muro neutralizante no llegó a ejecutarse como lo propuso Le Corbusier por las dudas técnicas y económicas que en su día suscitó, y que en esta tesis se exponen y documentan.

Esta tesis doctoral pretende contribuir a despejar alguna de estas dudas, principalmente las de tipo técnico. Y lo hace mediante la propuesta de diversos modelos numéricos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Método de Elementos Finitos (FEM), que tienen como principal objetivo predecir el comportamiento térmico de edificios acondicionados por este tipo de soluciones de fachadas activas, entre las que se encuentran las hoy denominadas Fachadas Transparentes Activas (ATF), grupo en el que el muro neutralizante se incluye. Con ello se alcanza el objetivo principal formulado: la generación de modelos numéricos capaces de simular y predecir con rigor el comportamiento térmico que la combinación de las dos innovaciones citadas produce en uno de los dormitorios principales de la Ciudad del Refugio de París, local que se considera como caso de estudio en esta tesis.

Para la generación de estos modelos numéricos ha sido de gran ayuda el disponer de los resultados de los ensayos sobre modelos físicos del muro neutralizante realizados en los años 30 por los ingenieros de Saint Gobain. Ello ha permitido ajustar y validar esos modelos, aumentando así el grado de certidumbre de las simulaciones efectuadas. La aplicación de estos modelos numéricos permite obtener resultados que verifican la idoneidad de estas soluciones innovadoras de Le Corbusier para el control ambiental interior de la habitación objeto de estudio de la Ciudad del Refugio de París. Pero también permite optimizar las soluciones que en su día propusieron Le Corbusier, G. Lyon y los ingenieros de Saint Gobain, que obviamente carecían de las herramientas de las que actualmente se dispone, fundamentalmente para aumentar la eficiencia energética del sistema térmico.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

1. Introducción

1.1. Justificación del estudio

La motivación de esta tesis se justifica por el interés por conocer si determinadas soluciones innovadoras sobre la relación entre arquitectura y energía, planteadas en los inicios de la Arquitectura Moderna, hubieran funcionado de haber prosperado.

“(…) las nuevas técnicas nos han traído nuevas palabras y las nuevas técnicas, a las que es imposible resistirse, llaman a nuestra imaginación”

Le Corbusier, *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme* (1930)

La presente tesis pretende profundizar en el conocimiento sobre lo que Le Corbusier denominó “edificio isotérmico”, así como en la idoneidad técnica de dos de sus propuestas más innovadoras conocidas: “el muro neutralizante” y “la respiración exacta”, como estrategias para alcanzar ese objetivo del “edificio isotérmico” que sería a su vez lo que él denominaba como “*machine à habiter*”. Estas estrategias fueron en su momento objeto de controversia, lo que impidió que fueran puestas en práctica tal y como Le Corbusier las concibió y G. Lyon las calculó, como más tarde detallaremos. Eran los años finales de la segunda década del pasado siglo, en un periodo temporal muy significativo e inestable desde el punto económico, social y político tras la Primera Guerra Mundial, que desembocaría en la Gran Depresión de 1929, primero, y en la Segunda Guerra Mundial, diez años después, que naturalmente afectó a la Arquitectura.

En esos momentos del periodo de entreguerras, el Movimiento Moderno generó una nueva relación entre arquitectura y energía, basada principalmente en la analogía formal de la máquina, con una doble estética: la de la máquina funcional y la de la máquina simbólica [1]. La aceleración progresiva de los procesos de construcción y la incorporación de grandes acristalamientos, junto con el abandono de las soluciones tradicionales, generaron un comportamiento energético desconocido que era difícil de controlar y requería nuevas estrategias energéticas. El resultado fue una forma arquitectónica cada vez más ajena a las condiciones climáticas y una búsqueda de homogeneidad térmica basada en la implementación de nuevas tecnologías industriales, que implicaron la creación de un clima artificial.

Por entonces no se disponían de herramientas fiables para la simulación ambiental y energética que pudieran refrendar lo adecuado, o no, de estas soluciones innovadoras propuestas por Le Corbusier, lo que indudablemente perjudicó a su potencial implantación y, en parte, fueron una de las causas de su posterior desengaño respecto a la máquina. No obstante, su influjo y repercusión ha sido notable para el desarrollo de soluciones recientes de fachadas activas para el acondicionamiento ambiental en edificios que tienen

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

por objetivo la eficiencia energética, dentro de un contexto de arquitectura sostenible, lo que les confiere plena actualidad.

Utilizando herramientas de simulación ambiental y energética de las que hoy en día se disponen, esta tesis ha desarrollado modelos matemáticos predictivos del comportamiento ambiental y energético de estas soluciones innovadoras de Le Corbusier y las ha aplicado al edificio más representativo donde él las quiso poner en práctica: La Ciudad del Refugio de París (1929-1930) (Fig. 1), un edificio de alojamiento para 500-600 personas sin hogar del Ejército de Salvación. Esto ha permitido, además de ofrecer propuestas propias de esta tesis sobre modelos predictivos asociados a soluciones de acondicionamiento térmico vinculadas a la envolvente de los edificios, sacar conclusiones sobre la idoneidad ambiental y energética de estas soluciones innovadoras de Le Corbusier, principales contribuciones de esta tesis doctoral.

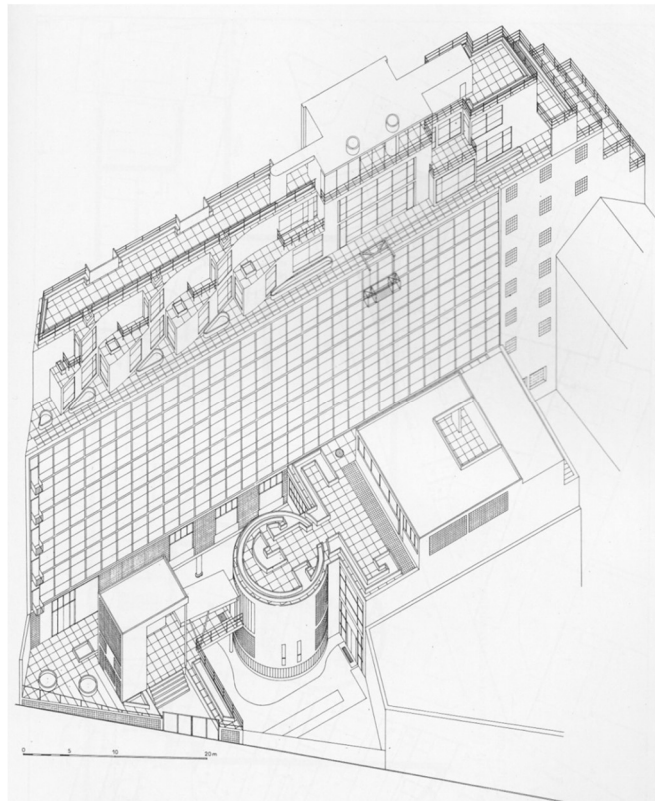


Figura 1. Vista axonométrica de la Ciudad del Refugio tal como se construyó.

1.2. Novedad de las propuestas de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios

Le Corbusier, figura clave del espíritu nuevo y moderno de la década de 1920, se consideró propulsor de propuestas arquitectónicas innovadoras consecuentes tanto del rigor científico como de la intuición [2]. En su arquitectura, Le Corbusier adoptó el vidrio como paradigma de la modernidad e intentó satisfacer las demandas ambientales del hombre moderno a través de una arquitectura que aspiraba a ser independiente

del clima, generando ambientes térmicos uniformes (*isothermiques*) a través de la sublimación de un desarrollo técnico y tecnológico que proporcionó mediante un lenguaje arquitectónico universal.

Le Corbusier presentó sus propuestas de innovaciones tecnológicas resultado de sus ideales mecanicistas, con el objetivo de controlar el medio ambiente como se define en la Carta de Atenas en 1933. El desarrollo de la vivienda Domino en 1914 le permitió investigar nuevas funciones para la construcción de envolventes [3]. La búsqueda de una tecnología ambiental inmaterial, menos relacionada con la forma arquitectónica, le llevó a la propuesta del muro neutralizante (Fig. 2), basada en una envolvente formada por un panel de vidrio doble con una cámara interior a través de la cual circula aire, previamente calentado o enfriado por los sistemas de calefacción o refrigeración del edificio. Esta solución fue diseñada para reducir los intercambios de energía entre el interior y el exterior a través de los paramentos acristalados [4]. La temperatura del aire que circula a través de la cámara dependía de las condiciones de la temperatura exterior.

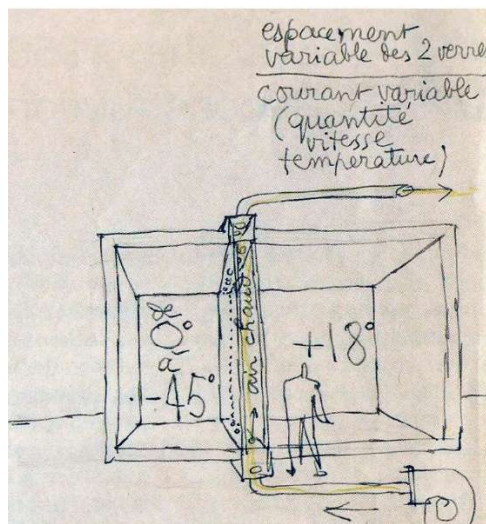


Figura 2. Funcionamiento del muro neutralizante.

En 1923, en la villa Schwob, en La Chaux-de-Fonds, había utilizado una especie de muro neutralizante para todas las ventanas principales, algunas hasta con dos niveles de altura, que tenían doble vidrio con paso de tuberías de calefacción en el espacio generado entre los dos acristalamientos para evitar las corrientes de aire frío en invierno. No obstante, Le Corbusier sabía que el muro neutralizante debía ser un sistema técnicamente más complejo [5].

En 1926, en la exposición "The Deutscher Weissenhof" en Stuttgart, Le Corbusier sigue experimentando soluciones de envolventes para viviendas mediante acristalamientos dobles y una gran cámara de aire interior donde incorpora vegetación, como la Casa tipo Citrohan. (Fig. 3-4) [6]. Las aperturas de ventanas en las fachadas no se efectúan sólo al norte, como en las primeras viviendas, sino que se localiza en diferentes orientaciones, favoreciendo para estos climas fríos el efecto invernadero e incrementando la ganancia solar a través de grandes huecos.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



Figura 3. Vista del ventanal desde el interior de la casa tipo Citrohan. Stuttgart 1926.

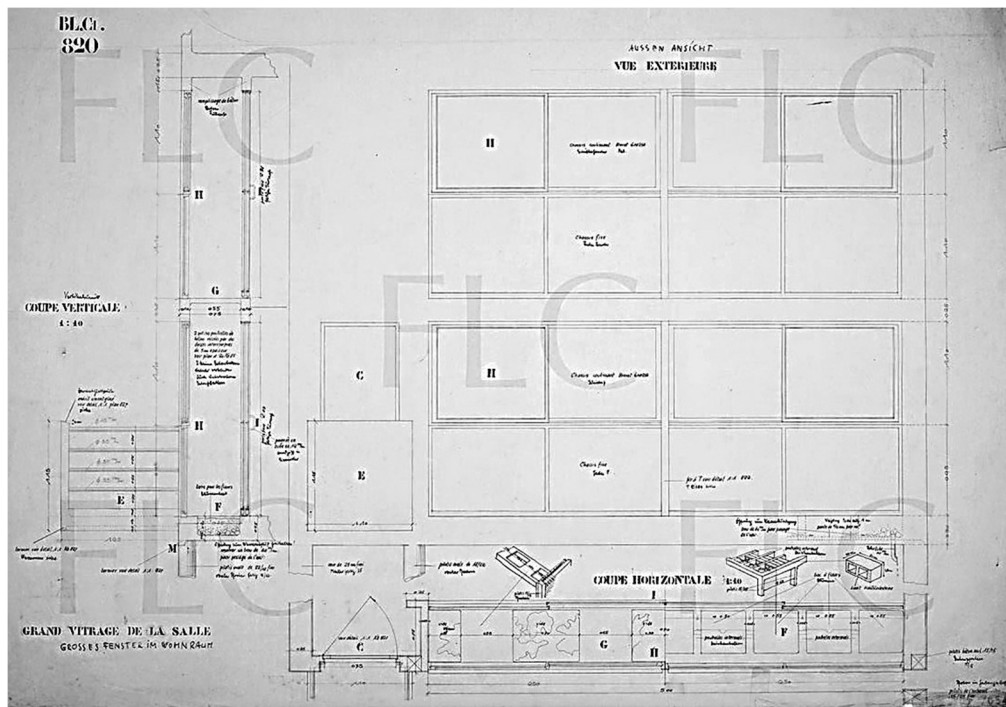


Figura 4. Detalle constructivo del doble acristalamiento de la casa tipo Citrohan. Stuttgart 1926.

La solución de la respiración exacta (Fig. 5), la planteó utilizando una analogía orgánica: la de un sistema arterial de conductos de ventilación con difusores para forzar aire limpio en el interior, y un sistema de conductos de retorno para regenerar el aire contaminado de la atmósfera interior. Aunque este sistema ya había sido utilizado por G. Lyon, prestigioso ingeniero francés especialista en acondicionamiento ambiental, sobre todo acústico, en la Salle Pleyel de París en 1927 [7], por lo general no se incorporaba a los edificios residenciales. Esta solución estaba asociada a que el edificio fuera completamente hermético, sin necesidad de que hubiera ventanas con un sistema de apertura (Fig. 6). Le Corbusier propuso la aplicación

de esta solución con el muro neutralizante en todas las condiciones ambientales exteriores asociadas a los diferentes climas. En un mundo mecánico, el edificio como máquina de habitar tenía que funcionar desde Dakar hasta Moscú [5].

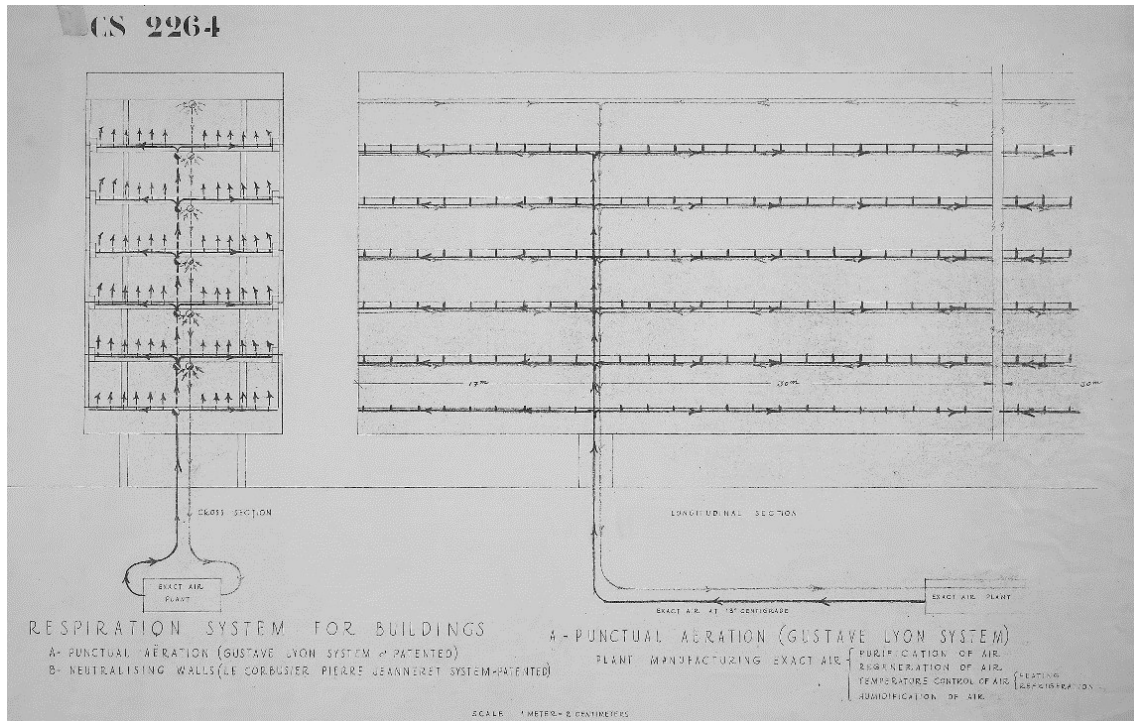


Figura 5. Esquema de funcionamiento de la respiración exacta y muro neutralizante.

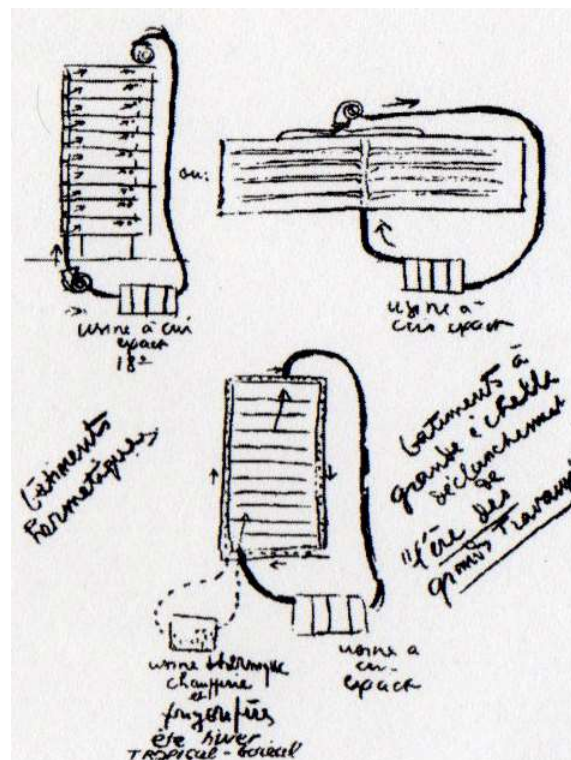


Figura 6. Esquema de Le Corbusier: El edificio hermético.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

En 1927 propuso la respiración exacta para el concurso del edificio Liga de Naciones en Ginebra [8], incluyendo grandes ventiladores mecánicos que impulsaban el aire hacia el gran auditorio (Fig. 7-8). Sobre los aspectos técnicos y la elaboración de detalles para su diseño pidió asesoramiento a G. Lyon. Se propusieron nuevas soluciones técnicas: el acondicionamiento acústico del salón de actos, modernos sistemas de calefacción y ventilación, acceso racional de automóviles y previsión para el estacionamiento de los mismos, así como dar forma a la idea de levantar un palacio construido de hormigón armado. Finalmente, la fundación de la Sociedad de Naciones adjudicó el premio a Le Corbusier pero, tras varios conflictos políticos, este proyecto nunca se construyó. No obstante, la notoriedad que obtuvo este proyecto le permitió a Le Corbusier recibir numerosos encargos.

En su propuesta ganadora para el concurso del edificio de oficinas Centrosoyuz en Moscú, en 1928, también con la colaboración de G. Lyon [9], volvió a recurrir a la solución propuesta para el edificio de la Liga de las Naciones: la respiración exacta para purificar el aire, regenerarlo, controlar su temperatura y humidificarlo en las ocasiones que fuera necesario, y propuso por primera vez el muro neutralizante para el perímetro acristalado del edificio. Estas dos propuestas produjeron numerosas dudas técnicas y económicas a sus promotores (Fig. 9) [10-11]. Por ello, en enero de 1930, Le Corbusier pidió asesoramiento a la empresa norteamericana "American Blower Corporation" [12] para contrastar la idoneidad de su planteamiento en relación al estudio, dimensionado y costes de explotación, tanto del muro neutralizante como del sistema de respiración exacta, frente a los sistemas y equipos empleados en Estados Unidos. La respuesta de la empresa norteamericana fue la siguiente [13]:

[...] La propuesta de la demanda aproximadamente consumiría cuatro veces más vapor de agua y más del doble de energía de los ventiladores para calefacción y ventilación de lo que sería necesario con los métodos actuales empleados en nuestro país para las mismas condiciones atmosféricas. [...]

Además, es necesario prever una mayor cantidad de aire de refrigeración, del orden del triple en tiempo de calor que de calefacción, y un aumento en la renovación de aire de los locales cerca de siete veces más del que consideramos necesario para las grandes salas de audiencia, y diez veces más que para un edificio del mismo uso. [...]

La Comisión de Construcción de Moscú renunció a la ejecución de los sistemas de acristalamiento, calefacción y ventilación propuestos por Le Corbusier en el Centrosoyuz, ya que resultaban demasiado costosos de implementar en la terrible situación en la que se encontraba la construcción en Rusia en aquella época. Por tanto, finalmente se aprobó la instalación de un sistema de calefacción convencional con radiadores, y la materialización de la fachada con una única hoja de vidrio con ventanas practicables.

Finalmente, en 1933, cuando ya se estaba ejecutando la Ciudad del Refugio en París, Le Corbusier participó en el concurso para realizar los apartamentos Swiss Rentenanstalt en Zurich [14]. Su propuesta, que de nuevo planteaba la combinación del muro neutralizante y de la respiración exacta, tal como Le Corbusier expresaba en sus dibujos (Fig. 10), no resultó ganadora, por lo que sus intentos por ejecutar conjuntamente ambos sistemas para el acondicionamiento ambiental fueron infructuosos.

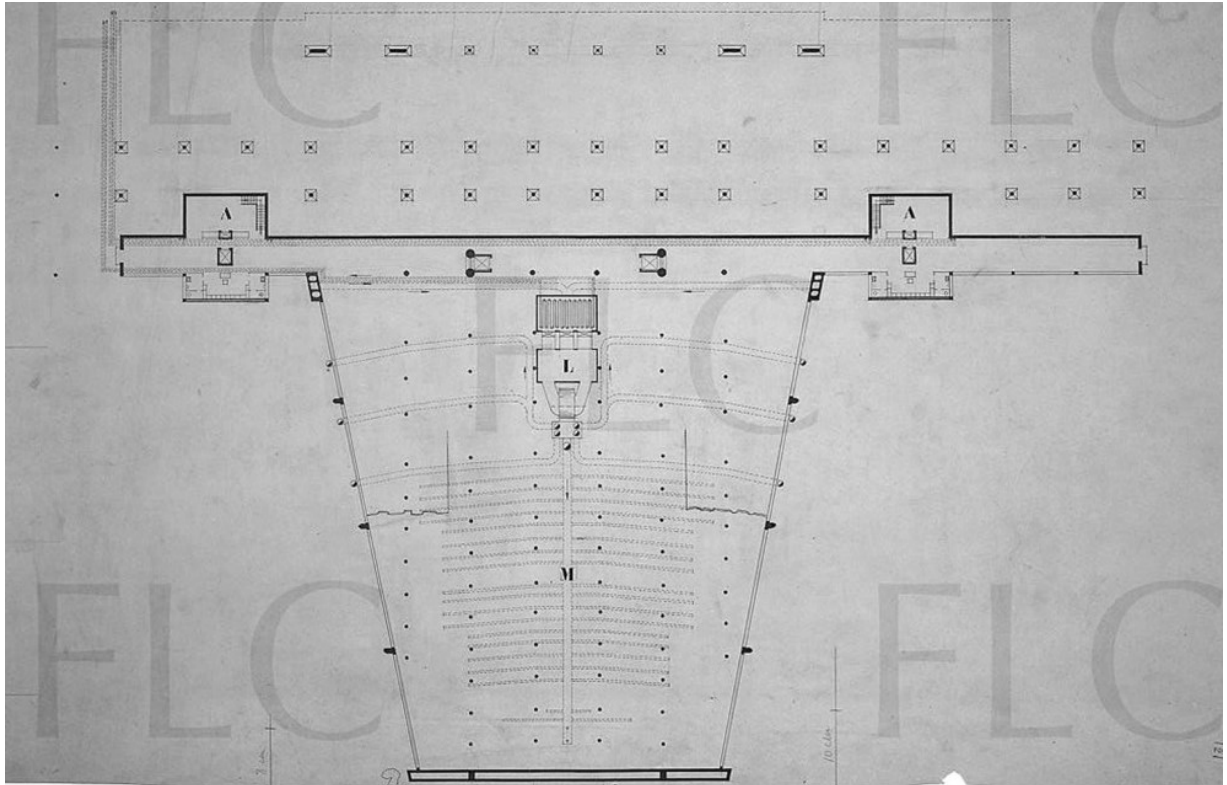


Figura 7. Planta de trazado de conductos para el Edificio Liga de las Naciones. Ginebra 1927.

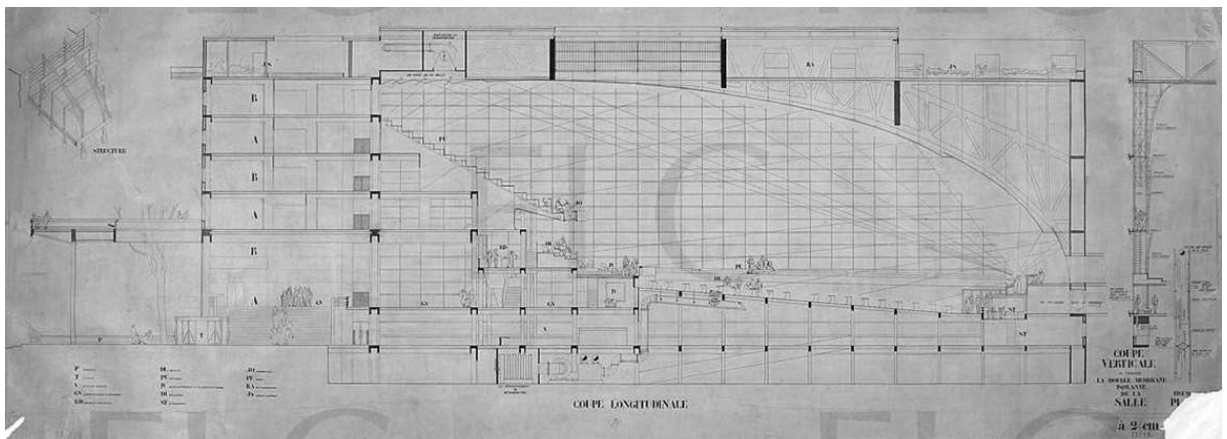


Figura 8. Sección de trazado de conductos para el Edificio Liga de las Naciones. Ginebra 1927.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

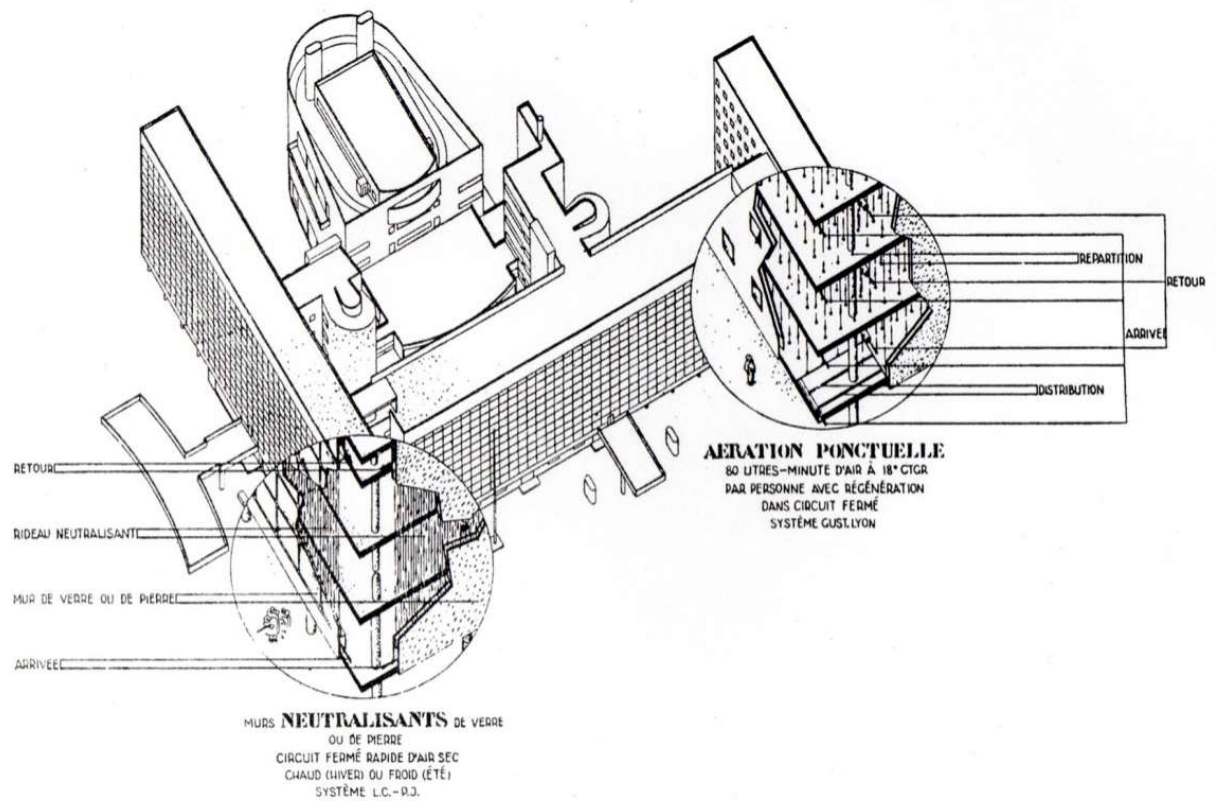


Figura 9. Axonometría del funcionamiento del muro neutralizante y la respiración exacta del edificio Centrosoyuz. Moscú 1928.

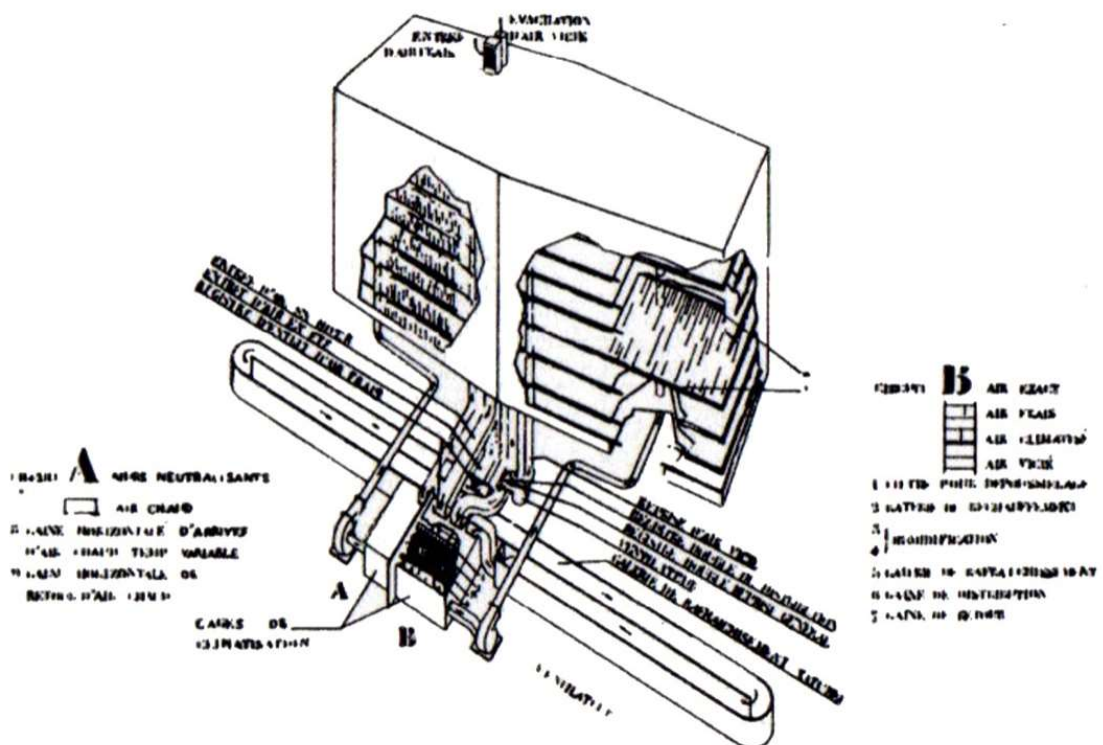


Figura 10. Axonometría del funcionamiento del muro neutralizante y la respiración exacta del edificio Swiss Rentenanstalt. Zurich 1933.

La falta de interés en la integración de sistemas activos en fachadas para resolver el acondicionamiento térmico de edificios contrasta con el éxito y el progreso en sistemas de aire acondicionado que se producen en los EE.UU. a lo largo del siglo XX [15]. Le Corbusier obtuvo conocimiento de primera mano de estos avances en su viaje a los EE.UU. en 1935 [16] y los adoptó en sus proyectos [17]. Compartió el interés de los ingenieros estadounidenses en la creación de atmósferas artificiales interiores, saludables y libres de contaminación (incluida la contaminación acústica), en edificios herméticos, independientemente de las condiciones climáticas exteriores [18].

Pasaron 50 años antes de que otro gran arquitecto, N. Foster, recuperara, a finales de los años 80, la idea del muro neutralizante de Le Corbusier en el Parque Microelectrónico de Duisburg, uno de los primeros ejemplos y más representativo de la denominada Eco-Arquitectura [19], compartiendo con el maestro suizo su búsqueda para una interpretación más holística de la arquitectura. Esto le llevó a proponer modernos sistemas de fachada activos como soluciones para el acondicionamiento ambiental, hacia una búsqueda del aumento de la eficiencia energética en los edificios.

-
- 1 Fernández Galiano, L. (2000). *Fire and Memory: On Architecture and Energy*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
 - 2 Sáenz de Oiza, F.J. (1987). Entrevista a Francisco Sáez de Oiza. *Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid*. 264-265.
 - 3 Cohen, J. L. (2004). *Le Corbusier, 1887-1965: The Lyricism of Architecture in the Machine Age*. London: Taschen.
 - 4 Bryan, H. (1991). *Le Corbusier and the "Mur Neutralisant: An Early Experiment in Double Envelope Construction*. Proceedings of the Ninth International PLEA Conference. pp. 257-62.
 - 5 Banham, R. (1969). *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. Architectural Press: London, UK.
 - 6 Urbano, R. (2007-2009). *The role of Le Corbusier environmental control proposals in the evolution of the glass facade. About Le Mur neutralizant & other strategies*. Paris: Foundation Le Corbusier Research Fellowship.
 - 7 Boesiger, W. (1999). *Le Corbusier et Pierre Jeanneret: oeuvre complete. Vol 2, 1929-1934*. Basel, Suiza: Birkhauser.
 - 8 Colquhoun, A. (1987). The strategies of the Grands Travaux. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Assemblage, 4, 66-81.
 - 9 Abitare. (1960). Abitare: Interior design, architecture, art. *Abitare Segesta*, 292.
 - 10 Torres Cueco, J. (2010). *Le Corbusier, Arquitectura y Técnica: El Centrosoyus de Moscú, 1928-1936*. Cuadernos de Pos-Grado en Arquitectura y Urbanismo. 69-92.
 - 11 Le Corbusier. (1928). *Plan pour l'édification du bâtiment du Centrosoyus de Moscou*. Julliet. 6. FLC H2-9-15.
 - 12 Still, M.F.R. (1930). *Carta al vicepresidente de American Blower Corporation*. 3 de enero.
 - 13 Cuadernos de Postgrado. (1930). *La respuesta de la American Blower Corporation*, 24 de enero.

- 14 Torres Cueco, J. (2004). *Le Corbusier: visiones de la técnica en cinco tiempos*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos.
- 15 Cooper, G. (1998). *Air-Conditioning America: Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960*. Johns Hopkins Univ. Press.
- 16 Lemoine, B. (1987). Le Corbusier dans L'Architecture d'Aujourd'hui. *Architecture d'Aujourd'hui* nº 9-45.
- 17 Le Corbusier. (1947). *When the cathedrals were white: a journey to the country of timid people*. New York: Cornwall Press.
- 18 Le Corbusier. (1946). *Towards a New Architecture*. London: Architectural Press.
- 19 Slessor, C. (1997). *Eco-Tech: Sustainable Architecture and High Technology*. London: Thames and Hudson Ltd.

2. Estado general del arte sobre las fachadas activas de doble piel

Principalmente, en estos últimos años se han hecho sucesivas propuestas de fachadas activas, tanto de una sola piel como de doble piel (DSF, "Double Skin Façade"). Desde el punto de vista de la eficiencia energética, las segundas constituyen una mejora respecto de las primeras, según lo analizan Gratia y de Herde [1] para diferentes climas. Al ser hoy en día un tema importante de investigación, son numerosos los estudios realizados relacionados con el diseño óptimo de las DSF en los que se utilizan normalmente modelos predictivos de simulación del comportamiento ambiental y energético, como los de Joe et al. [2], Ghadimi et al. [3], Zhou et al. [4], y Shameri et al. [5]. En los dos últimos se hizo una importante revisión del estado del arte en 2010 y 2011, respectivamente, sobre las posibilidades ambientales y energéticas de este tipo de fachadas.

El análisis del comportamiento térmico de una DSF mediante modelos numéricos, con sus dificultades y limitaciones, es estudiado por diversos autores tanto en zonas frías como cálidas. Hien et al. [6] se centran en el estudio de las DSF para zonas frías en invierno. En este caso es necesario controlar la condensación de la superficie, especialmente por la noche en climas tropicales húmedos, lo que conduce al uso de ventiladores mecánicos con el consiguiente aumento del consumo eléctrico. En zonas cálidas en verano, entre ellas el área mediterránea, se ha de evitar el problema del sobrecalentamiento por el aumento de la temperatura del aire en la cavidad debido a las altas temperaturas alcanzadas en la superficie del vidrio exterior. Chen et al. [7], a través de un modelo matemático de fachada de doble piel de vidrio con lamas localizadas en la cámara de aire interior, analiza una DSF ventilada, con un dispositivo de protección solar integrado y controlado, que permite mejorar las condiciones térmicas del edificio, reduciendo las ganancias térmicas de refrigeración en zonas climáticas con veranos cálidos.

Gratia y André [8] también proponen soluciones que utilicen dispositivos de protección solar, evaluando la posición eficiente de los mismos, considerando que la ubicación de esos dispositivos de sombras, su color y las aperturas de la doble piel son los factores más relevantes. Larsen, Rengifo y Filippín [9] proponen medidas correctivas en climas mediterráneos, basadas en la orientación, para reducir el sobrecalentamiento mediante la selección de los tipos más adecuados de acristalamiento y ventilación de la cavidad interior. En climas fríos, sin embargo, este problema del sobrecalentamiento puede ser fácilmente controlado, como lo señalan Gelesz y Reith [10], que analizaron el comportamiento de estas fachadas en edificios de Europa central en función de la orientación. Según este estudio, la necesidad de calentar una celda totalmente acristalada es mínima y, al aplicar un sistema de ventilación en la cavidad y dispositivos de sombreado, las cargas de enfriamiento pueden reducirse en un 7% y entre un 9-12%, en promedio, en comparación con una fachada sin cámara de aire activa con doble o triple acristalamiento, respectivamente.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Barbosa e Ip [11] analizan el uso de DSF en edificios con ventilación natural, evaluando la influencia de la solución de fachada y la configuración del edificio, así como los efectos de las condiciones ambientales en el exterior. La eficiencia de la ventilación en la cámara de aire intermedia como solución de aislamiento térmico dinámico con respecto a la radiación solar es estudiada por Hazem, Ameghchouche y Bougriou [12].

Aunque algunos experimentos predicen el comportamiento de una DSF utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics) [13], hasta la fecha muy pocos estudios analizan el efecto conjunto de una DSF con un sistema de ventilación mecánica para controlar la calidad del aire interior en edificios. Entre estos cabe destacar el de Fallahi, Haghighat y Elsadi [14], que desarrollan un modelo numérico para predecir los perfiles térmicos de diferentes configuraciones de DSF, con el fin de calcular las cargas térmicas resultantes de un área interior contigua a la fachada.

Actualmente se utiliza una amplia gama de herramientas de simulación para evaluar el comportamiento térmico y energético de una DSF, como TRNSYS, EnergyPlus, BSim y BESP. Pappas y Zhai [15] hacen uso de un modelo iterativo con CFD y BESP (Building Energy Simulation Program), con el fin de establecer una serie de correlaciones entre ambos programas sobre los valores del flujo de aire en la cavidad, la estratificación de la temperatura del aire y el coeficiente de convección interior. Kim y Park [16,17] analizan si las herramientas de simulación pueden proporcionar descripciones precisas de las transferencias de calor que ocurren dentro de la compleja geometría 3D de las DSF. Mostraron las diferencias que se producen en el comportamiento térmico y en el flujo de aire en la cámara entre las mediciones de los datos experimentales y los resultados de la simulación con EnergyPlus. Los errores son causados principalmente por el grado de incertidumbre de los parámetros en la simulación, las simplificaciones durante el proceso de modelado o las limitaciones de la herramienta de simulación. Es por ello por lo que proponen el uso de modelos más avanzados con un acceso más amplio al software, ya que EnergyPlus no permite la exportación de ciertos parámetros, siendo necesarias nuevas expresiones para los coeficientes de transferencia de calor mediante convección, según la velocidad del aire dentro de la cavidad.

Peng et al. [18] analizan los factores de error entre los resultados experimentales y los simulados: modelos de turbulencia o laminar, software utilizado, influencia de las condiciones circundantes, malla, criterios de convergencia y estrategias de simulación. Además, se observan diferencias dependiendo de si el modelo se genera en 2D o 3D. En la mayoría de la literatura publicada, los modelos energéticos están condicionados por las mediciones tomadas de los elementos de estudio y la complejidad de su geometría, por el tipo de modelo (1D, 2D o 3D), por los largos tiempos de cálculo debido a la formulación numérica, el paso del tiempo establecido para los cálculos y los periodos de simulación [19]. Como resultado de esto, Fuliotto et al. [20] proponen métodos de desacoplamiento para evaluar el funcionamiento de las fachadas DSF mediante modelos 2D, como una herramienta informática simplificada para su diseño. Para ello,

realizaron simulaciones bidimensionales y tridimensionales con el objetivo de comparar las desviaciones de los resultados y así determinar la viabilidad en el uso de los modelos 2D. Los resultados de las simulaciones en 2D coincidían correctamente con las simulaciones en 3D, sugiriendo el uso de modelos bidimensionales para reducir el costo computacional.

- 1 Gratia, E., de Herde, A. (2004). Optimal operation of a south double-skin façade. *Energy and Buildings*, 36, 41–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.06.001>
- 2 Joe, J., Choi, W., Kwak, Y., Huh, J.-H. (2014). Optimal design of a multi-story double skin façade. *Energy and Buildings*, 76 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.002>
- 3 Ghadimi, M., Ghadamian, H., Hamidi, A.A., Shakouri, M., Ghahremanian, S. (2013). Numerical analysis and parametric study of the thermal behavior in multiple-skin facades. *Energy and Buildings*, 67, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.014>
- 4 Zhou, J., Chen, Y. (2010). A review on applying ventilated double-skin façade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1321–1328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.017>
- 5 Shameri, M.A., Alghoul, M.A., Sopian, K., Fauzi M. Zain, M., Elayeb, O. (2011). Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1468–1475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.016>
- 6 Hien, W.N., Liping, W., Chandra, A.N., Pandey, A.R., Xiaolin, W. (2005). Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. *Energy and Buildings*, 37, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.004>
- 7 Chen, Y.H., Sa, S., Zhou, Y., Wei, S.X., Zhiheng, T. (2006). A mathematical model of thermal channel glazing curtain wall. *Building Energy & Environment*, 25, 10–15.
- 8 Gratia, E., De Herde, A. (2007). The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. *Energy and Buildings*, 39, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.001>
- 9 Flores Larsen, S., Rengifo, L., Filippín, C. (2015). Double skin glazed façades in sunny Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 102, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.019>
- 10 Gelesz, A., Reith, A. (2015). Climate-based performance evaluation of double skin facades by building energy modelling in central Europe. *Energy Procedia*, 78, 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.735>
- 11 Barbosa, S., Ip, K. (2014). Perspectives of double-skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1019–1029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.192>
- 12 Hazem, A., Ameghchouche, M., Bougriou, C. (2015). A numerical analysis of the air ventilation management and assessment of the behavior of double skin facades. *Energy and Buildings*, 102, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.057>
- 13 Manz, H., Schaelin, A., Simmler, H. (2004). Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double facades. *Building Environmental*, 39, 1023–1033. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.003>
- 14 Fallahi, A., Haghighat, F., Elsadi, H. (2010). Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. *Energy and Buildings*, 42, 1499–1509. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.020>
- 15 Pappas, A., Zhai, Z. (2008). Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy Driven airflow. *Energy and Buildings*, 40, 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.002>

- 16 Kim, D.W., Park, C.S. (2011). Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 43, 12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>
- 17 Kim, D.W., Park, C.S. (2012). Corrigendum to “Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus”. *Energy and Buildings*, 49, 647. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.004>
- 18 Peng, L., Nielsen, P.V., Wang, X., Sadrizadeh S., Liu L., Li, Y. (2016). Possible user-dependent CFD predictions of transitional flow in building ventilation. *Building and Environment*, 99, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.014>.
- 19 Guardo, A., Coussirat, M., Egusquiza, E., Alavedra, P., Castilla, R. (2009). A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 41, 534–542. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.019>
- 20 Fuliotto, R., Cambuli, F., Mandas, N., Bacchin, N., Manara, G., Chen Q. (2010). Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade. *Energy and Buildings*, 42, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.006>

3. Estructura de la tesis

Tras la introducción (cap. 1), la exposición del estado general del arte sobre las fachadas activas de doble piel (cap. 2) y la presentación de la estructura la tesis, que se hace en este tercer capítulo, la tesis contiene otros siete capítulos más: uno primero donde se formula la hipótesis y se enuncian los objetivos de la tesis (cap. 4); un capítulo de tipo metodológico (cap. 5) donde se describe con detalle el caso de estudio, La Ciudad del Refugio en París, y se exponen, de manera general, los modelos matemáticos utilizados para hacer el análisis del comportamiento térmico de ese caso de estudio; otros cuatro capítulos (caps. 6 a 9), donde se exponen y discuten los resultados de diferentes niveles de aproximación al comportamiento térmico del caso de estudio utilizando los modelos predictivos descritos en el capítulo 5; y un capítulo final (cap. 10) donde se exponen las conclusiones y se enuncian las vías que se abren para futuras investigaciones. La tesis culmina con la descripción detallada de las fuentes bibliográficas utilizadas.

El núcleo central de la tesis lo constituyen los capítulos 6 a 9, que son los que ofrecen los resultados que permiten alcanzar los objetivos específicos formulados:

El capítulo 6, titulado “Propuestas innovadoras de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de edificios: Ciudad del Refugio en París”, tiene dos principales objetivos:

- Exponer los acontecimientos históricos más relevantes relativos al proyecto y construcción de las dos innovaciones tecnológicas, el muro neutralizante y la respiración exacta, en La Ciudad de Refugio en París.
- Efectuar una primera valoración sobre la influencia que, sobre el comportamiento térmico, supuso sustituir el muro neutralizante proyectado en la fachada sur del dormitorio colectivo por un *pan de verre*, solución finalmente ejecutada.

Este capítulo reproduce la comunicación presentada al congreso internacional PLEA 2013 denominado: Sustainable Architecture for a Renewable Future, celebrado en Munich en septiembre de 2013, con el título: *Future technologies on Le Corbusier's environmental conditioning systems*.

El capítulo 7, titulado “Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain”, tiene también dos objetivos principales:

- Ajustar el modelo numérico generado para valorar el funcionamiento del muro neutralizante como sistema de fachada activa para el acondicionamiento térmico de edificios, a partir de los resultados de los ensayos en modelos físicos realizados a principio de la década de los 30 por los ingenieros de Saint Gobain.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

- Aplicar dicho modelo numérico del muro neutralizante (sin el concurso de la respiración exacta) a la habitación objeto de estudio en diferentes condiciones ambientales (invierno y verano) y operacionales (calefacción y refrigeración).

Este capítulo reproduce la comunicación presentada al congreso internacional LC 2015, Le Corbusier, 50 years later, celebrado en Valencia en noviembre de 2015, con el título: *The mur neutralisant as an active thermal system Saint Gobain tests (1931) versus CFD simulation (2015)*.

El capítulo 8, titulado “Modelo numérico simplificado del efecto combinado del muro neutralizante y respiración exacta”, tiene como principal objetivo elaborar un primer modelo predictivo simplificado, aunque basado en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), del comportamiento térmico del caso de estudio, a partir del funcionamiento combinado del muro neutralizante y de la respiración exacta, tal y como fueron proyectados por Le Corbusier. La simplificación del modelo se basa en considerar la distribución de temperaturas del dormitorio principal de la Ciudad del Refugio como un problema bidimensional (2D), mientras que el muro neutralizante se plantea como un problema unidimensional (1D). Mediante el uso de un código acoplado se logra generar un modelo numérico que tiene en cuenta el funcionamiento combinado de ambas innovaciones en el caso de estudio. La aplicación de este modelo permite obtener conclusiones acerca del comportamiento térmico que hubiera habido en la habitación objeto de estudio de haber ejecutado estas innovaciones tal y como los proyectó Le Corbusier.

Este capítulo reproduce el artículo publicado en 2015 en la revista Energy & Buildings, revista de primer cuartil (Q1) y primer decil (D1) en JCR (Posición: 6/126 en Engineering, Civil), cuyo título es: *Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to “The City of Refuge” by Le Corbusier*.

El capítulo 9, titulado “Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada activa transparente de doble piel y un sistema de ventilación mecánica”, tiene dos objetivos principales:

- Elaborar un modelo predictivo más desarrollado que el anterior para la evaluación del comportamiento térmico del caso de estudio y que podría aplicarse no solo a la combinación del muro neutralizante y de la respiración exacta, tal y como fueron proyectados por Le Corbusier, sino también al efecto conjunto de una Fachada Activa Transparente (ATF) de doble piel y de un sistema de ventilación mecánica. La complejidad del modelo radica, sobre todo, en considerar la distribución de temperaturas del dormitorio principal de la Ciudad del Refugio como un problema tridimensional (3D), manteniéndose el planteamiento del muro neutralizante como un problema unidimensional (1D).

- Optimizar los parámetros de diseño de la ATF y del sistema de ventilación mecánica respecto a las propuestas hechas por Le Corbusier y Lyon, con el fin de lograr un mejor ajuste de las condiciones de confort y aumentar la eficiencia energética del sistema térmico combinado.

Este capítulo reproduce el artículo publicado en 2018 en la revista *Energies*, revista de segundo tercil (T2) y tercer cuartil (Q3) en JCR (Posición: 56/103 en *Energy and Fuels*), cuyo título es: *Thermal 3D CFD simulation with Active Transparent Façade in buildings*.

El esquema seguido en estos cuatro capítulos centrales es en todos los casos el mismo: en primer lugar, se ofrece un resumen (en torno a 400-500 palabras) de la publicación en español, ya que esa publicación está escrita en lengua inglesa. En ese resumen se formulan objetivos, se describen brevemente los métodos, se hace una síntesis de los resultados y se exponen las principales conclusiones. A continuación, se reproduce la comunicación y el artículo en el mismo formato como fue publicado. Por último, de esa publicación se extraen la exposición de resultados y su discusión y se hace una amplia síntesis en español.

La exposición general que del estado del arte se hace en el capítulo 2 se completa con la realizada en estos cuatro capítulos centrales.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

4. Hipótesis y objetivos

4.1. Hipótesis

Esta tesis parte de la hipótesis de que resulta posible generar modelos numéricos para evaluar el comportamiento térmico de soluciones de fachadas activas como las propuestas por Le Corbusier con el muro neutralizante (un tipo de fachada de doble piel, DSF, que entraría en la categoría de las fachadas transparentes activas, ATF), incluso actuando de forma combinada con sistemas de ventilación mecánica instalados para el control de la calidad de aire interior.

4.2. Objetivo general

Para confirmar dicha hipótesis, se establece como principal objetivo la generación de modelos matemáticos, capaces de simular y predecir con rigor el comportamiento térmico que los dos sistemas de acondicionamiento ambiental propuestos por Le Corbusier, el muro neutralizante y la respiración exacta, producen en uno de los dormitorios principales de la Ciudad del Refugio de París (1929-1933), local que se considera como caso de estudio en esta tesis.

Después del levantamiento del estado del arte, no nos constan antecedentes de modelos numéricos que evalúen la acción conjunta de una ATF de doble piel como solución de fachada, con cámara de aire intermedia de tipo activo, con un sistema de ventilación mecánica instalado para el control de calidad de aire interior en la habitación objeto de estudio, lo que le confiere novedad a esta tesis doctoral y le permite aportar una serie de contribuciones a la profundización del conocimiento sobre este tipo de soluciones activas para el acondicionamiento ambiental y energético en edificios, así como a la propia obra del arquitecto suizo.

4.3. Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo general de esta investigación, se exponen los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo específico 1:**

Ofrecer un desarrollo temporal de los sucesos que ocurrieron en la Ciudad del Refugio en París respecto a su comportamiento térmico, tal y como se construyó, y contrastarlo con lo que hubiera sido ese comportamiento si se hubiera ejecutado la fachada según la propuesta de Le Corbusier de muro neutralizante.

- **Objetivo específico 2:**

Establecer la idoneidad del muro neutralizante como solución de fachada activa para el acondicionamiento térmico de edificios, tal y como fue ensayada por los ingenieros de la empresa francesa Saint Gobain en sus laboratorios, en 1932, a partir de los cálculos realizados por G. Lyon.

- **Objetivo específico 3:**

Utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), desarrollar un primer modelo numérico simplificado capaz de acoplar el código asociado al sistema térmico del muro neutralizante (doble acristalamiento con cámara de aire activa) con el asociado al sistema de ventilación del espacio acondicionado, tal y como fueron propuestos por Le Corbusier, con el fin de valorar el comportamiento térmico de la habitación objeto de estudio: un dormitorio colectivo de la Ciudad del Refugio en París.

- **Objetivo específico 4:**

Utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional y el Método de Elementos Finitos, desarrollar un segundo modelo numérico más complejo y flexible que el anterior, que combine la acción simultánea de una ATF como sistema de acondicionamiento térmico (el muro neutralizante sería una de las soluciones posibles de ATF, pero cabrían otras distintas) con un sistema de ventilación mecánica, todo ello con el fin de establecer estrategias de optimización energética del sistema propuesto por Le Corbusier.

5. Metodología

Los métodos utilizados están ampliamente expuestos en las cuatro publicaciones que constituyen el núcleo central de la tesis y que se han reflejado en los capítulos 6 a 9 de la tesis. No obstante, se ha considerado conveniente ahondar en un mayor conocimiento del caso de estudio, por un lado, y de los modelos numéricos generados, por otro.

5.1. Caso de Estudio

Se ha elaborado una cronología detallada del proyecto de la Ciudad del Refugio parisina, desde el concurso que lo promovió hasta su reforma final, exponiendo los numerosos avatares y los principales cambios que sufrió el edificio.

5.1. Propuesta y programa del edificio

El proyecto de la Ciudad del Refugio (Fig. 11) recuerda al gran Barge Louis Catherine (Fig. 12) y al Palais du Peuple (Fig. 13), edificios parisinos proyectados con anterioridad por Le Corbusier y destinados al Ejército de la Salvación, organización de beneficencia social destinado a personas sin hogar [1]. Antes de la Ciudad del Refugio existían ya ejemplos, como la Cité d'Hebergement y la City Colony, que seguían los postulados del fundador del primer Ejército de Salvación, William Booth, quien planteaba las tres necesidades básicas para las que debería destinarse estos centros: la comida, el refugio y el trabajo, además de la religión [2]. Los arquitectos e ingenieros que intervenían en el proyecto y construcción debían comprender esta forma de estructurar socialmente estos edificios. Le Corbusier añadió a estos planteamientos la racionalización científica en plena era mecanicista, intentando la conjunción entre arquitectura y técnica.

El programa que el Ejército de Salvación había previsto para la Ciudad del Refugio comprendía tres tipos de servicios: alojamiento para dormir, cocina para el servicio de comidas y talleres para ayudar a la "inserción" laboral de sus ocupantes. Además, contaba con prestaciones sociales y administrativas: salón de reuniones, salas de estar para los residentes, salas de consulta médica, guardería, lavandería, cambio de ropa, oficinas y alojamientos para el personal [3].

El edificio debía alojar entre 500 y 600 personas, distribuidas en grandes dormitorios colectivos y en *roomettes*, habitaciones pequeñas principalmente para las mujeres solteras con hijos (Fig. 14). La Ciudad del Refugio estaba destinada a ser más que un simple refugio para la noche; por ello debía contar con instalaciones en varios niveles que funcionaran durante todo el día, atendiendo así a las necesidades de sus ocupantes [4].

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Como resultado de sus propuestas sobre planificación urbana, Le Corbusier consideró la Ciudad del Refugio como un centro principal social y recreativo, dentro de uno de los barrios periféricos y de clase trabajadora de París.

La evolución desde el primer anteproyecto realizado en 1929 hasta el edificio ejecutado en 1933 muestra el progreso de Le Corbusier por encajar la idea y el programa del edificio en la parcela triangular de unos 1.700 m² (Fig. 15), con una solución de gran impacto visual. Le Corbusier planteó el problema de la vivienda con nuevos programas que comprendían servicios, talleres y oficinas, y que resolvió como producto de una planificación urbana y de una arquitectura moderna [3].

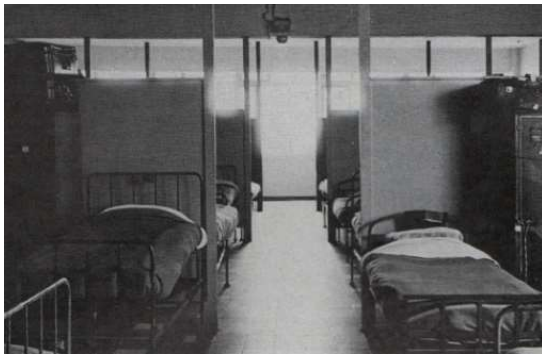


Figura 11. Ciudad del Refugio 1930.

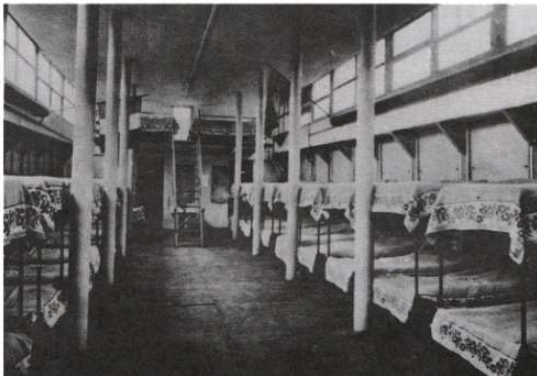


Figura 12. Barge Louis Catherine 1929.



Figura 13. Palais du People 1926.



Figura 14. Roomettes. 1954.

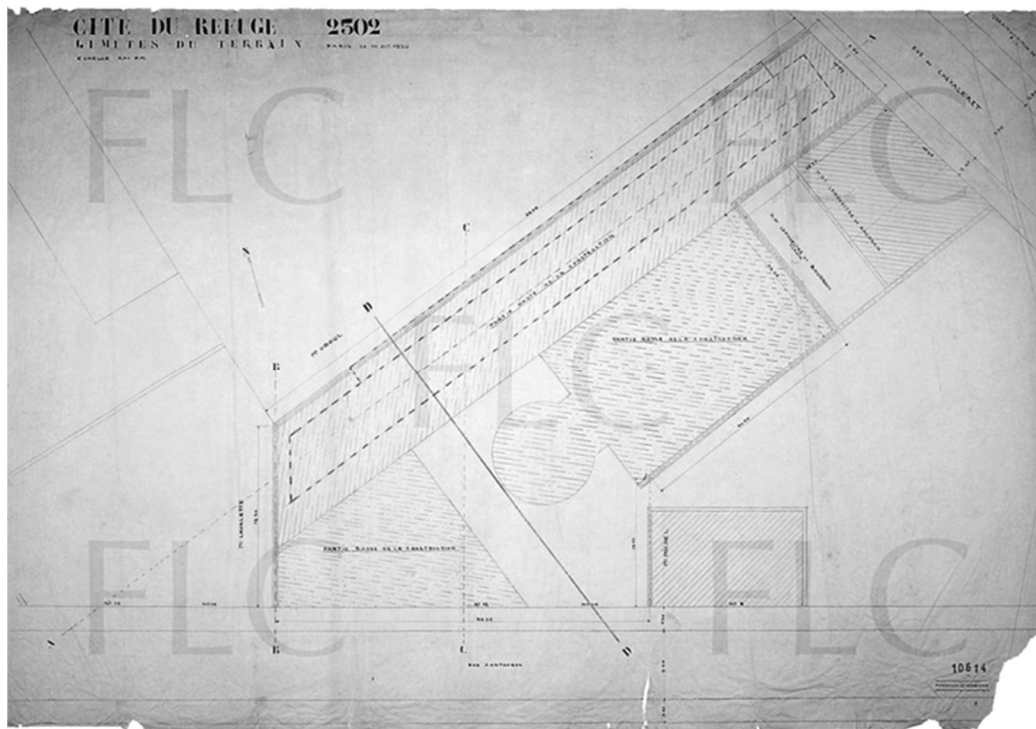


Figura 15. Características de la parcela y de la edificación.

5.2. Descripción del edificio

El edificio, tras varios diseños previos, se estructuró en las siguientes plantas: una planta de sótano (Fig. 16), destinada principalmente a talleres de trabajo, lavanderías y salas de máquinas; la planta a nivel de *pilotis* (Fig. 17) con los servicios de talleres, cocina y gran sala de conferencias (266 plazas); la planta baja (Fig. 18), planteada como un conjunto de escenas secuenciadas (Fig. 19): desde la rue Cantagrel se accede a un vestíbulo porticado, exento, y posteriormente a una pasarela (Fig. 20) que termina en una rotonda donde se realizaban los ingresos. Este espacio estaba comunicado con la zona de las oficinas de servicios sociales y los grandes comedores, y permitía la conexión con el gran bloque acristalado mediante unas

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

escaleras que separaban a la derecha la zona de habitaciones de hombres y a la izquierda la zona de mujeres. A partir de la planta primera y hasta la quinta se plantean los niveles en los se debería haber instalado el gran muro neutralizante: en la planta primera (Fig. 21), para la habitación de mujeres (67 camas) objeto de estudio en esta tesis; en la planta segunda (Fig. 22), para una habitación de mujeres (33 camas), junto a tres *roomettes* y lavandería; en la planta tercera y cuarta (Fig. 23), para 18 *roomettes*; y en la planta quinta (Fig. 24), para dos habitaciones infantiles (30 cunas) anexas a una sala de juegos de niños. Finalmente, en las últimas plantas: sexta, séptima y octava, el edificio se retranquea, alojando las habitaciones de madres con hijos, los apartamentos de los responsables del Ejército de la Salvación y el *solarium*, respectivamente (Fig. 25-27) [5].

La gran fachada sur acristalada con el muro neutralizante estaría compuesta por un doble plano de vidrio con una cámara de aire intermedia, en la que se impulsaría aire a una temperatura que dependería de la temperatura exterior, con el fin de mantener la temperatura interior constante en estas estancias independientemente de la estación del año. Un sistema de ventilación mecánica totalmente independiente de este muro, la respiración exacta, pero actuando de forma combinada con él, pretendía garantizar una adecuada calidad de aire interior en el edificio, al mismo tiempo que contribuir al confort térmico interior de las estancias que disponían del muro neutralizante.

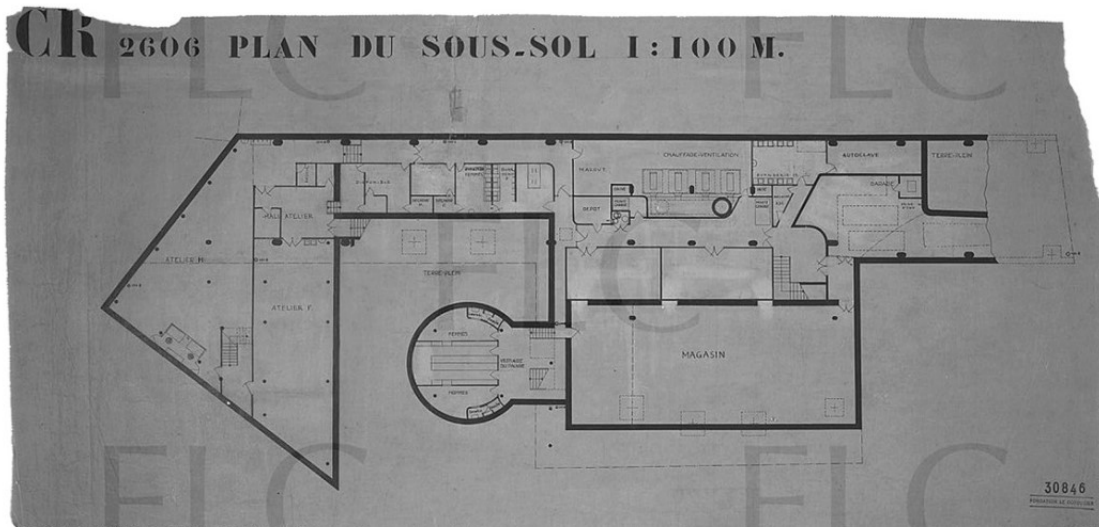


Figura 16. Planta sótano.

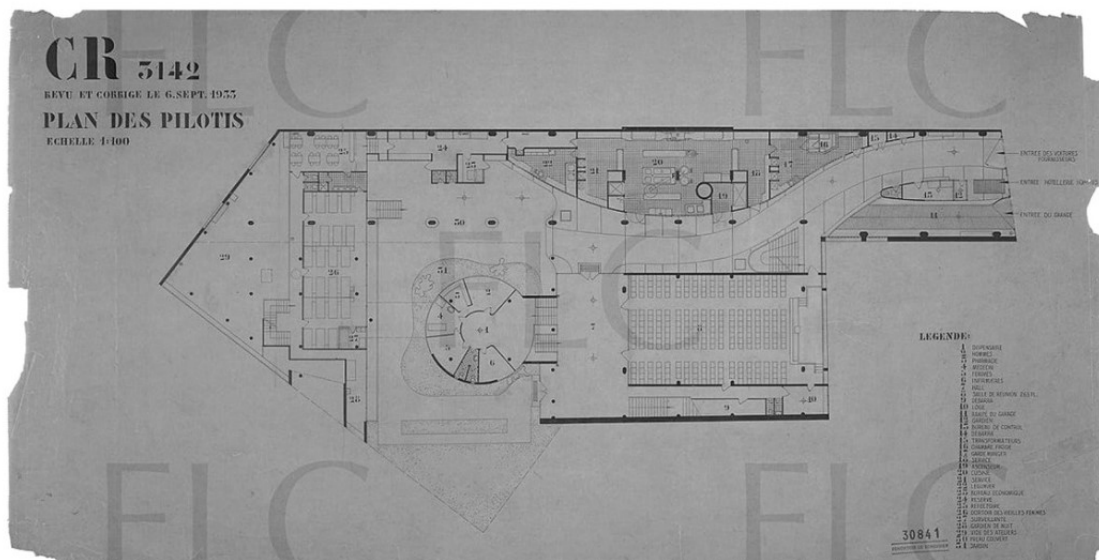


Figura 17. Planta *pilotis*.

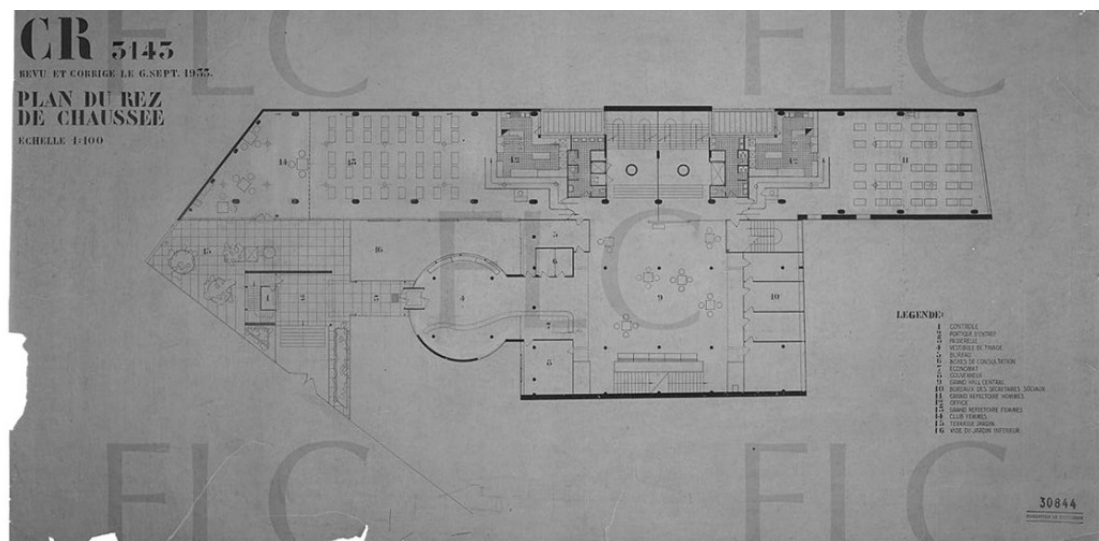


Figura 18. Planta baja.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



Figura 19. Vestíbulo de entrada a la Ciudad del Refugio.



Figura 20. Pasarela de comunicación entre vestíbulo y rotonda de ingreso a la Ciudad del Refugio. 1930.

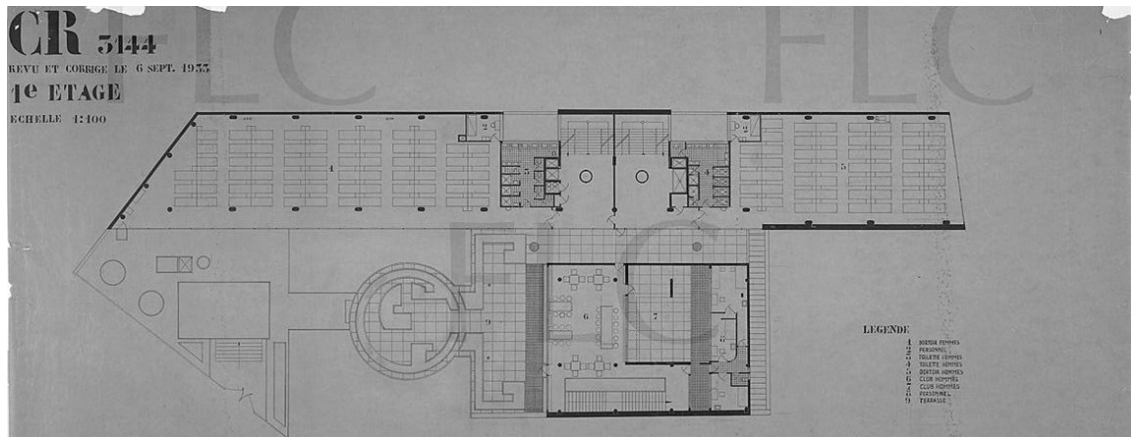


Figura 21. Planta primera.

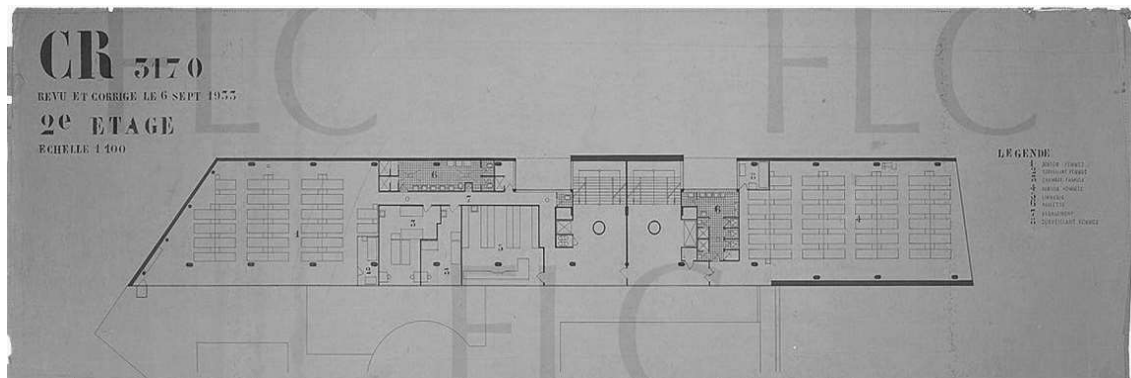


Figura 22. Planta segunda.

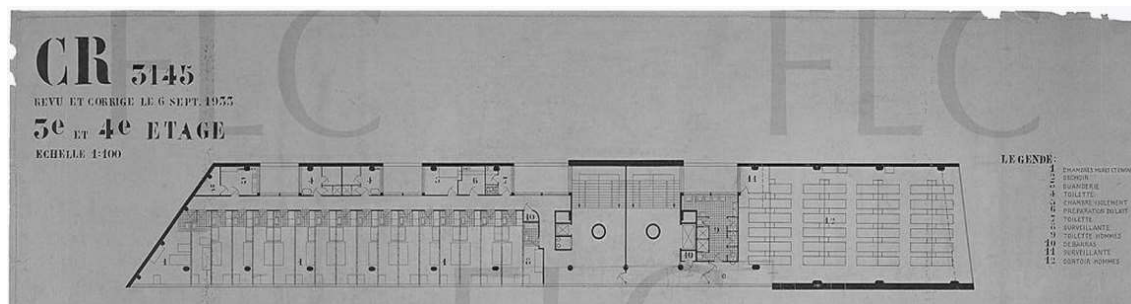


Figura 23. Planta tercera y cuarta.

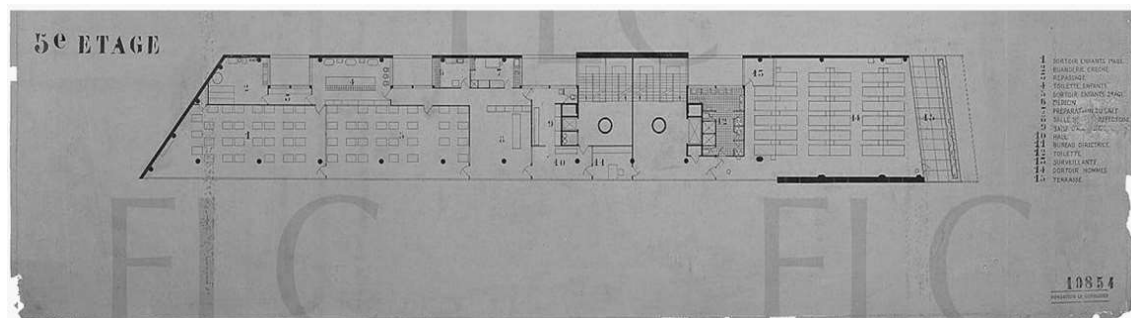


Figura 24. Planta quinta.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

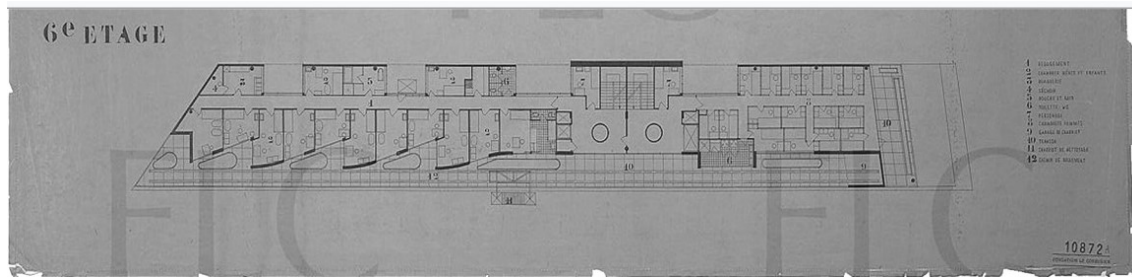


Figura 25. Planta sexta.

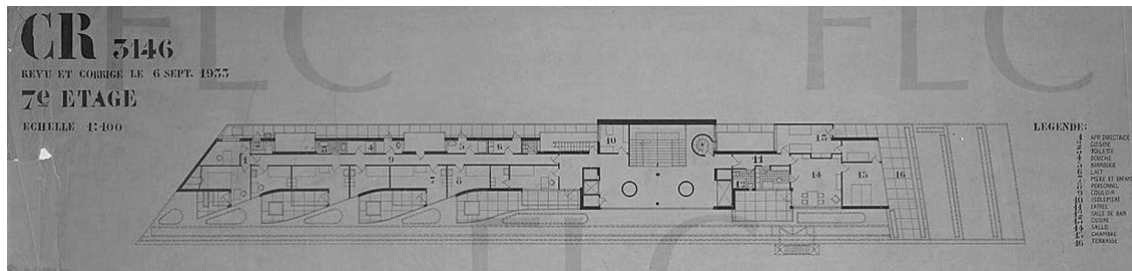


Figura 26. Planta séptima.

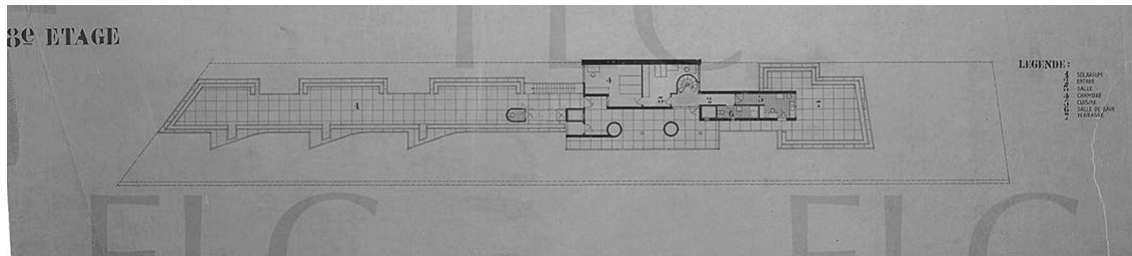


Figura 27. Planta octava.

5.3. Cronología de los acontecimientos acaecidos en el edificio

En 1929 [6, Carta 1] se inicia el concurso promovido por el Ejército de la Salvación del que el proyecto de Le Corbusier sería el vencedor. Su propuesta de llevar a cabo la ejecución combinada del muro neutralizante y la respiración exacta pretendía proporcionar al edificio un control artificial del ambiente interior. En su propuesta el muro neutralizante construiría la envolvente de la fachada sur, completamente hermética, de unos 1000 m², por el que, entre sus dos hojas de vidrio, se haría circular un determinado caudal de aire previamente calentado o enfriado, con el fin de mantener la temperatura interior constante (*isothermique*) e igual a la de confort. Según Le Corbusier, este sistema permitiría obtener un excelente aislamiento térmico mediante la recirculación mecánica del aire impulsado en la cámara y el control de su temperatura, según las condiciones climáticas exteriores (cámara activa) [7].

Durante 1930, mientras que se estaba construyendo el edificio Centrosoyuz en Moscú, tal como se describió en el apartado 1.2, Le Corbusier pudo conocer la respuesta de especialistas sobre el comportamiento esperado del muro neutralizante y la respiración exacta frente a los avanzados sistemas que se estaban empleando en EE.UU. A pesar de ello, Le Corbusier persevera en su propuesta de proponer la construcción del muro neutralizante y la aplicación de la respiración exacta para La Ciudad del Refugio.

En abril de 1931, durante la ejecución del proyecto, surgieron alteraciones en el edificio para cumplir las normativas urbanísticas [8], principalmente en lo que se refiere a la altura del edificio, que afectaron a la construcción del muro neutralizante proyectado. Le Corbusier describe a la Prefectura del Sena esas modificaciones del siguiente modo [9]:

“En primer lugar, en la Rue Chevaleret se dispondrá de una terraza entre la planta tercera y la cuarta, accesible desde el piso superior por una escalera pequeña, y en la Rue Cantagrel se realizará un retranqueo en la planta sexta, séptima y octava. En segundo lugar, en la Rue Cantagrel el pan de verre de vidrio de 1.000 m² se inclinará ligeramente hacia atrás con el fin de cumplir la limitación de altura”.

Como consecuencia de ello, Le Corbusier tuvo que reducir 7.2 centímetros en cada voladizo de los pisos en los que iba a ser construido el muro neutralizante (Fig. 28-29). Por tanto, el plano establecido para el mismo, entre la planta primera y quinta, tuvo que construirse con una inclinación de unos 40 centímetros hacia el interior del edificio, apreciables en la sección transversal [10]. Estas modificaciones retrasaron la construcción de la Ciudad del Refugio, ya que la obra fue interrumpida durante casi un año.

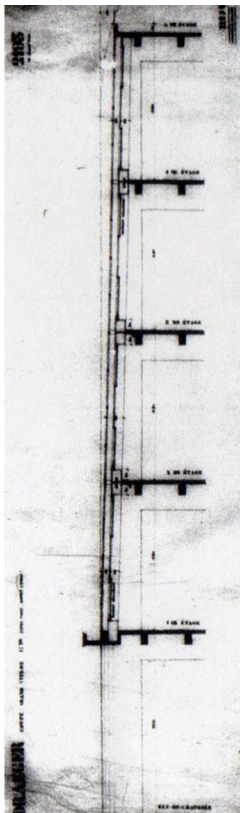


Figura 28. Sección vertical por muro neutralizante. Ciudad del Refugio. París 1930.

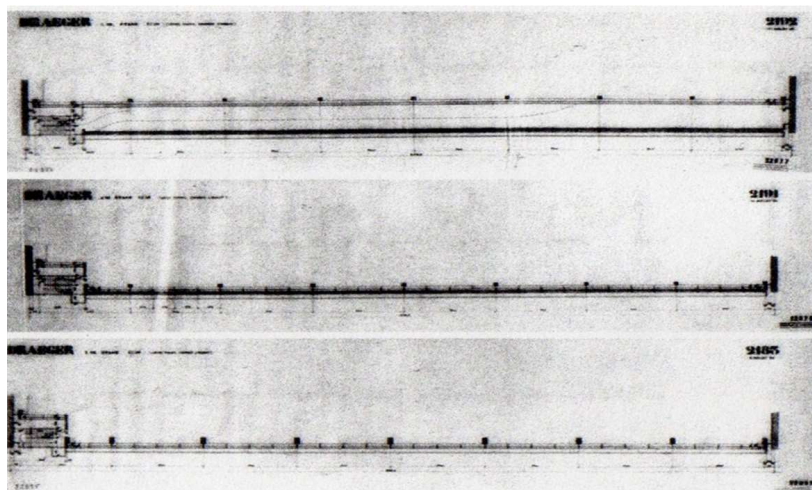


Figura 29. Secciones horizontales por el muro neutralizante. Ciudad del Refugio. París 1930

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

En julio de 1931, el secretario general del Ejército de la Salvación, A.J. Benwell, plantea las siguientes dos cuestiones a Le Corbusier [6, Carta 6], pendientes de ser resueltas en la Ciudad del Refugio:

- Sobre la transparencia de la fachada de vidrio, su costo, su limpieza y su compatibilidad con el descanso nocturno:

[...] Yo no sé si los Señores Arquitectos para ejecutar el proyecto han tenido en cuenta la finalidad a la que se destina la Ciudad del Refugio. Básicamente, es la entrada a un refugio para pasar la noche, esto significa que el espacio se utilizará para dar cabida a unas 500 personas pobres, gracias al Ejército de la Salvación. Normalmente, los huéspedes llegan alrededor de las 6 ó 7 pm y deben salir a las 8 am. El gran edificio estará vacío durante el día, excepto el restaurante donde se continúa trabajando, y la administración. La parte del edificio utilizada para madres con hijos va a estar constantemente ocupada, por lo que será bueno tener el máximo de luz y sol, y en particular, en los lugares destinados a los niños. Teniendo en cuenta esta cuestión, no debemos perder de vista el hecho de que para muchas personas, especialmente para las personas mayores, es muy difícil dormir en plena luz. Si tenemos una fachada de vidrio en todos los dormitorios, tendremos que eliminar la luz. ¿Cuál es, entonces, el beneficio del sistema de esta fachada de vidrio?

Otro asunto de gran importancia corresponde con la limpieza de la fachada. ¿Cómo cree que se puede limpiar regularmente un sistema de vidrios? Piense que la lluvia no será suficiente.

Pensaba en todo esto, y especialmente en el hecho de que el edificio que construimos es en su totalidad un refugio para pasar la noche.

Otro problema es el precio. Se requiere establecer una comparación entre una fachada de ventanas, como por ejemplo las utilizadas en el Palais du Peuple, y el sistema propuesto.

- Sobre la idoneidad del sistema de ventilación, dada la higiene de los ocupantes potenciales:

[...] Usted ha propuesto un sistema de circulación constante para permitir una temperatura uniforme y una purificación del aire. ¿Dónde podemos examinar grandes edificios en los que el sistema que usted apoya ha sido puesto a prueba

durante un período lo suficientemente largo para permitir un juicio final? Usted tiene que considerar que la Ciudad del Refugio acogerá a unos cientos de personas pobres, a menudo sucias e insalubres, la mayoría de los cuales frecuentemente rehúsan lavarse, vienen con sus pertenencias personales que están a menudo en un estado lamentable y, en definitiva, la mayor dificultad que tenemos en estos casos es mantener la limpieza en las habitaciones.

¿De verdad creen que el sistema de ventilación que usted propone para la noche será suficiente para ventilar las habitaciones ocupadas por personas en tales condiciones? Para una bonita sala, como la Sala Pleyel, que es frecuentada siempre por personas muy exclusivas, una gran sala sin particiones, y muchos rincones, creo que el sistema es capaz de funcionar a la perfección, haciendo que el aire sea más puro. También creo que en una clínica, en un hospital donde las condiciones son completamente diferentes, un sistema así puede tener éxito, pero me pregunto qué va a pasar si se aplica en la Ciudad del Refugio, casa, que será la sede de numerosos infelices.

Como respuesta a estos requerimientos, en agosto de 1931, Le Corbusier le escribe al comisario del Ejército de Salvación, A. Peyron, para darle las explicaciones sobre esas cuestiones planteadas por el secretario general [6, Carta 7].

Por lo que se refiere a la existencia del gran ventanal de vidrio en la fachada, lo justifica principalmente por la gran profundidad de los dormitorios y la relativa baja altura de los forjados. Sostiene que la “mayoría de los edificios modernos requieren superficies de vidrio máximas” (fábricas de luz), solución plenamente posible con las técnicas constructivas de su tiempo y con un costo relativamente bajo. Insiste en la idoneidad de estas superficies, principalmente en países de climas templados. Y añade en relación a la transparencia del muro neutralizante:

[...] Esto depende de las fachadas y de las habitaciones.

En invierno, la orientación hacia el sur permite el paso de una cantidad de calor solar que, de acuerdo con algunos ingenieros, no implica costes adicionales de calefacción, este es el caso en la Ciudad del Refugio, donde la ventana está situada completamente al sur.

En el verano, la fachada de vidrio será equipada en el interior por persianas destinadas a oscurecer los locales por la noche, y estas persianas servirán de escudo contra el sol. Pero teníamos previsto en la parte superior del

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

acristalamiento, por medio de un tubo que se coloca horizontalmente, una vaporización de agua destinada a gotear sobre el vidrio y que los ingenieros creen que debería tener el efecto de reducir significativamente la temperatura.

Le Corbusier defiende la fachada de vidrio hermética, frente a la opción de hacer las ventanas practicables, puesto que, en su opinión, la tecnología moderna permite la instalación de sistemas de ventilación mecánica, donde el aire exterior introducido es previamente filtrado y tratado térmicamente, antes de ser distribuido al interior del edificio con una velocidad adecuada, mientras que la ventilación natural, gracias a la aperturas de ventanas, no resuelve ni la contaminación del aire exterior, ni la protección del ruido exterior, ni la entrada de aire exterior a una temperatura que puede ser inapropiada para el confort térmico, argumentos todos ellos ya utilizados por los ingenieros norteamericanos de su tiempo, que estaban desarrollando los primeros sistemas de aire acondicionado [6].

Le Corbusier alude también en su respuesta a que la opinión de los médicos es unánime en valorar el favorable influjo de la radiación solar para la purificación de los ambientes interiores, efecto aún mayor cuando las superficies de vidrio permiten que una gran superficie del suelo de la estancia reciba radiación directa [6, Carta 8].

Por último, a la cuestión planteada sobre la limpieza de las ventanas, Le Corbusier informa que se va a proceder a abrir un dispositivo de elemental sencillez, que permite que uno o dos trabajadores puedan limpiar el vidrio exterior sin ningún inconveniente ni peligro.

En ese mismo mes de agosto de 1931, A. Peyron felicita a Le Corbusier por el majestuoso edificio y por la rapidez de su construcción [6, Carta 9] (las diez plantas se realizaron en 130 días, 13 días para cada losa de forjado de unos 700 m²).

Finalmente, por razones principalmente económicas, el muro neutralizante no se ejecutó y se sustituyó por un *pan de verre* [6], consiste en una simple hoja de 7 mm de espesor de vidrio templado, fabricado con la técnica Securit, desarrollado por Saint Gobain a petición de la industria del automóvil en 1929 [11].

En noviembre de 1931 se firmó el contrato para que la compañía "M.M.M" fuera la encargada de la ejecución de ese *pan de verre*, y el 15 de diciembre de 1931 terminó su ejecución a falta de la elección del sistema de ventilación y de acondicionamiento térmico. Aunque Le Corbusier no consiguió que se convirtiera finalmente en un muro neutralizante, reservó el espacio para su construcción, así como para la ubicación de la entrada y salida de los posibles conductos.

Ese *pan de verre* disponía de un sistema de protección solar situado por el interior, consiste en una hoja de PVC que podía deslizarse horizontalmente mediante unas guías en el suelo y cubrir por completo cada uno de los módulos acristalados de 2 m. Su separación respecto a la fachada acristalada permitía crear una cámara de aire cuando se cerraba. Resulta difícil de apreciar desde el exterior por los reflejos que producen los vidrios (Fig. 30). A pesar de que muchos autores mencionan el mal funcionamiento de este *pan de verre* para obtener unas adecuadas condiciones ambientales interiores en la Ciudad del Refugio, ninguno de ellos lo relaciona con el tipo de protección solar que se dispuso tras él (Fig. 31).



Figura 30. Perspectiva de la fachada ejecutada con *pan de verre*. 1931.



Figura 31. Vista desde el exterior de las persianas interiores

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Una vez desestimada la construcción del muro neutralizante, se invalidaba el medio principal para lograr controlar la temperatura interior, por lo que, durante 1932, Le Corbusier estudió las diferentes opciones de sistemas de climatización para la Ciudad del Refugio que ofrecían las compañías instaladoras. Entre esas compañías destacaban "Etablissements Leroy", que propuso un sistema de calefacción por convección con radiadores, y "Sulzer Company", que propuso un sistema combinado de calefacción mediante aire caliente y ventilación mecánica. Finalmente, ninguna de esas dos propuestas fue elegida, ya que no incorporaban sistema de refrigeración debido al bajo presupuesto con el que se realizó el encargo [6]. A pesar de ello, Le Corbusier tenía esperanzas de encontrar una compañía capaz de ejecutarlo.

No obstante, a pesar de que se había desestimado la construcción del muro neutralizante, Le Corbusier y G. Lyon seguían interesados en conocer los resultados que éste hubiera producido de haber sido ejecutado. Este último, un ingeniero civil y gran especialista en acústica de salas, que había realizado investigaciones sobre calefacción y ventilación de edificios, había sido el responsable de dar una respuesta tecnológica a las dos innovaciones propuestas por Le Corbusier. Sus primeros cálculos de conductos habían tenido unos resultados satisfactorios en un primer ensayo realizado en un modelo a pequeña escala. A causa de este interés, los ingenieros de la compañía Saint Gobain renovaron estas pruebas en agosto de 1932, ya con el *pan de verre* de la Ciudad del Refugio ejecutado.

Realizaron diversos ensayos sobre diferentes tipos de acristalamientos con el fin de verificar los coeficientes de transmisión de calor propuestos por G. Lyon, así como para comprobar el funcionamiento del sistema de calefacción del aire de la cámara activa [12]. Para ello se habilitó un recinto con dos habitaciones: la pequeña simulaba el espacio exterior, "habitación fría"; y la grande simulaba el espacio interior, "habitación caliente" (Fig. 32-33). Esas dos habitaciones tenían diferentes condiciones térmicas: la temperatura de la "habitación fría" (exterior) se mantenía por debajo de 0 °C, mientras que la temperatura de la "habitación caliente" (interior) debía de alcanzar los 18 °C. En el interior de esta última se había instalado un radiador eléctrico como complemento al muro neutralizante. La separación entre ambas habitaciones se resolvía mediante un marco intermedio de 50 cm de espesor que permitía variar el espaciado de la cámara entre los vidrios desde 2 cm hasta 20 cm. Los diferentes vidrios utilizados se fijaban en cada uno de los marcos de madera, por lo que podían ser movidos. Antes de cada prueba los intersticios entre los marcos y la pared eran sellados con el fin de evitar la permeabilidad al aire.

Para las pruebas con los vidrios en los que había una cámara de aire activa, se hacía circular aire caliente en dicha cámara. El aire era calentado mediante unas resistencias eléctricas en el interior del conducto, que elevaban su temperatura hasta los 50 °C. Un ventilador impulsaba el aire a 120 mmca de presión mediante un conducto de 20 cm de diámetro. La distribución del aire en el interior de la cámara entre los dos vidrios se realizaba por la parte inferior, gracias a una pieza cónica que enlazaba la terminación del conducto con un *plenum* o caja de distribución.

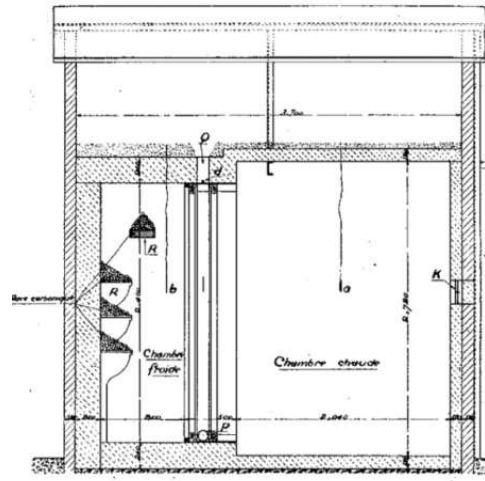


Figura 32. Sección. Ensayo Saint Gobain. 1932.

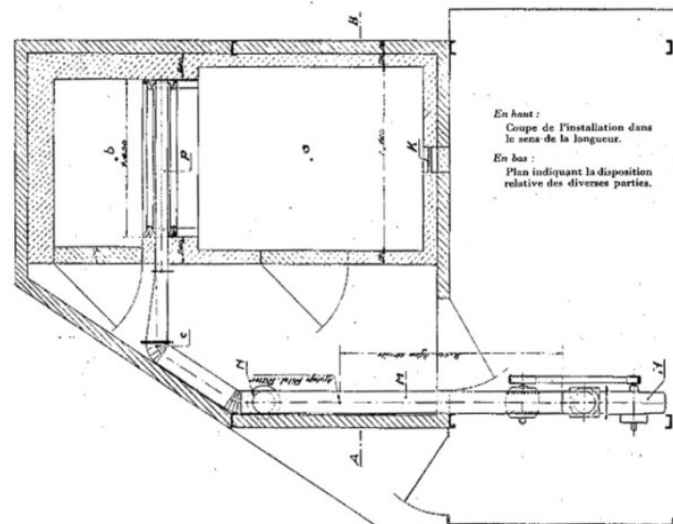


Figura 33. Planta. Ensayo Saint Gobain. 1932.

Por medio de estos ensayos se obtuvieron los coeficientes de transmisión de calor de diferentes tipos de acristalamiento, vidrios dobles de 2 mm, 7 mm y 12 mm, con una cámara activa de 100 mm (Fig.34).

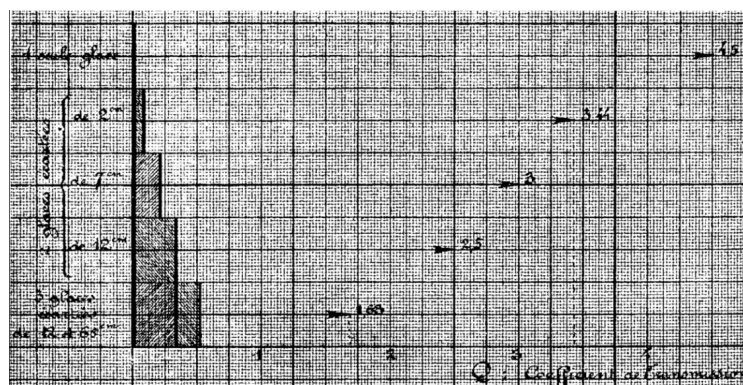


Figura 34. Resultados de los vidrios ensayados por Saint Gobain. 1931.

A pesar de que en la figura 34 se muestran los diferentes coeficientes de transmisión obtenidos de los ensayos de los diferentes tipos de acristalamientos, la publicación [13] de los técnicos de Saint Gobain se centra únicamente en especificar los valores de los coeficientes obtenidos para un muro neutralizante con vidrios de 7 mm de espesor cada uno y con una cámara activa de 100 mm de ancho, tal y como estaba previsto ejecutar en la Ciudad del Refugio.

Se probaron diferentes caudales de impulsión (150 l/s, 120 l/s y 60 l/s) por cada metro lineal de muro neutralizante. El aire era impulsado mediante las aperturas del plenum a 35 °C y era extraído en la parte superior a 29 °C. Del resultado de los ensayos se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Asegurar un caudal máximo de impulsión en la cámara activa de 60 l/s por cada metro lineal de muro neutralizante, ya que la turbulencia creada era suficiente como para producir un intercambio adecuado de calor.
- Establecer el ancho máximo de la cámara activa en 100 mm, ya que a partir de esta separación las corrientes de convección provocaban una disminución de los intercambios de calor y un aumento de las pérdidas térmicas.
- Mantener una diferencia térmica de al menos 10 °C entre la temperatura de salida del aire de impulsión de la cámara y la temperatura interior de la habitación caliente, para compensar las pérdidas térmicas.

El ensayo realizado para la determinación del coeficiente de transmisión de calor del *pan de verre* ejecutado en la Ciudad del Refugio con un único vidrio templado de 7 mm de espesor proporcionó un valor de 4.5 kcal/mh°C.

A modo de discusión del experimento, el ingeniero J. Le Braz [13] indicó que el doble acristalamiento no era suficiente para considerar efectivo el muro neutralizante, y por tanto sería necesario un tercer vidrio con otra cámara de aire, pero en este caso estanca, que permitiera aumentar el aislamiento como medida de ahorro energético, solución que corresponde al tercer tipo de los acristalamientos ensayados, recomendación que no obtuvo ninguna repercusión.

No sería hasta mayo de 1933 cuando se elige el sistema de climatización para la Ciudad del Refugio: "Sistema mixto de calefacción mediante radiadores y ventilación mecánica", a través de la "Compagnie de Chauffage Central par le Vide". El sistema de calefacción estaba compuesto por tres calderas de fuel (Fig. 35) y una red de tuberías de agua para radiadores; y el sistema de ventilación consistía en ocho redes de conductos de aire independientes, con ventiladores para la impulsión de aire exterior, previo filtrado en

cubierta, ventiladores de impulsión en pasillos y ventiladores de extracción de aire de retorno. El funcionamiento permitía en invierno 1 ACH, y en verano de 2 a 3.5 ACH [7].

En septiembre del mismo año Le Corbusier plantea la ampliación de este sistema con otro de refrigeración, propósito que no prosperó por razones económicas, pero que él mismo diseñó para una fácil ejecución (Fig. 36).

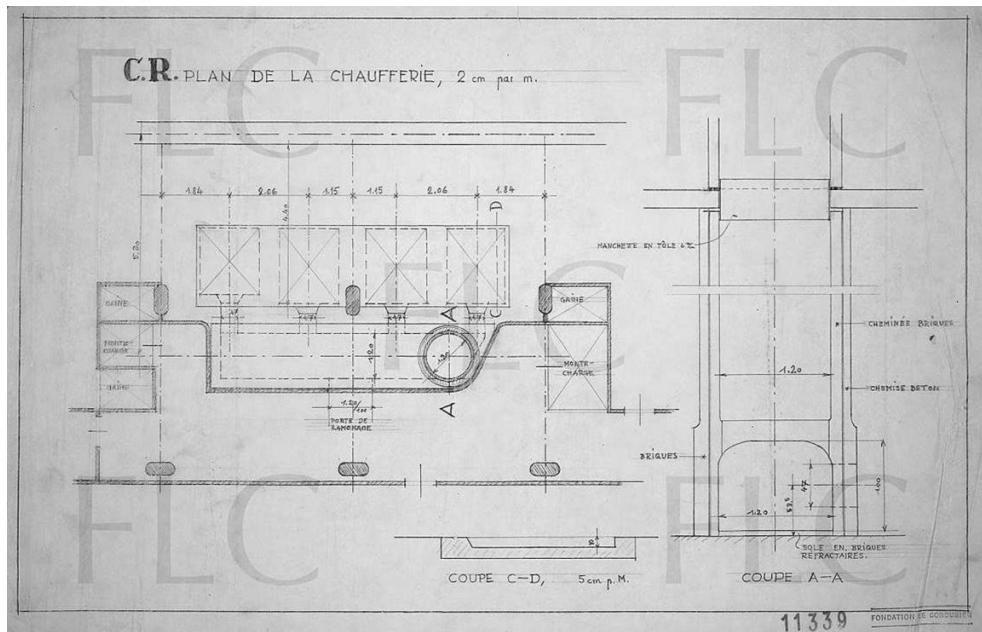


Figura 35. Propuesta de Le Corbusier para la sala de calefacción. 1933.

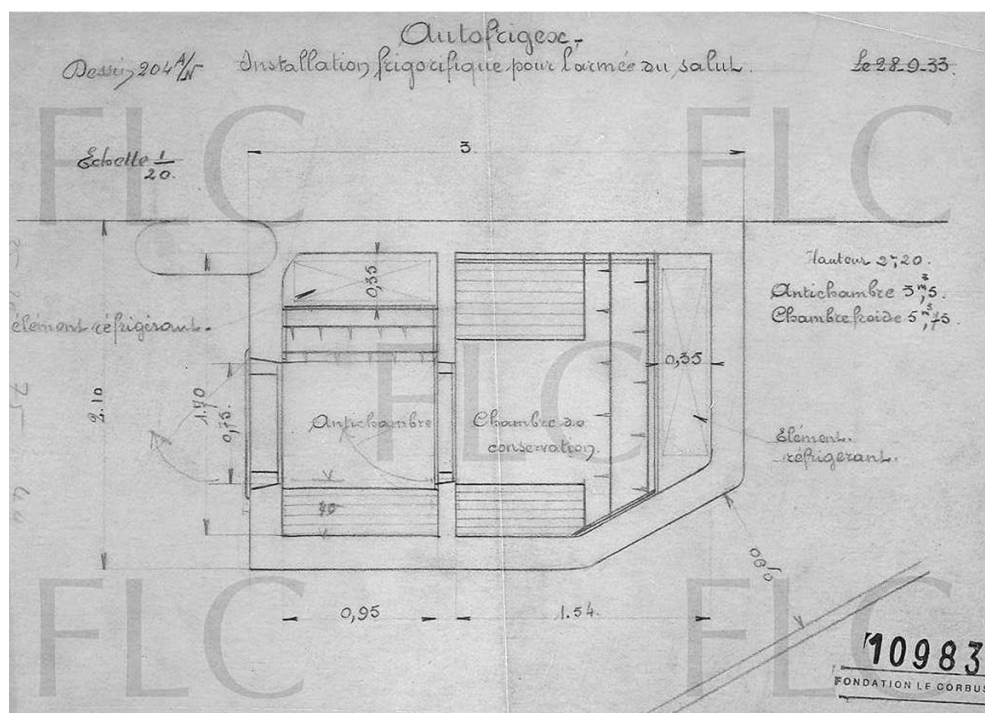


Figura 36. Propuesta de Le Corbusier para la sala de refrigeración. 1933.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

En diciembre de 1933, finalmente se inaugura la Ciudad del Refugio y se da por finalizada su construcción [6], con un retraso de tres años, aproximadamente, y unos gastos de ejecución mucho mayores de los esperados.

El comisario del Ejército de la Salvación, A. Peyron, orgulloso del edificio que se había construido, solicita a las autoridades públicas de la salud de París una primera inspección sobre el funcionamiento del edificio [1]. Como respuesta a esta solicitud, el 15 de diciembre de 1933 el arquitecto de la Prefectura de Policía, Mr. Drouet, emite un primer informe favorable sobre el sistema de ventilación y calefacción del edificio.

A partir de este momento comenzó un debate que duró 18 meses entre el Ejército de la Salvación y los propios ocupantes de la Ciudad del Refugio, ya que se sentían sofocados por el calor, debido al fallo en el funcionamiento del sistema de ventilación y al *pan de verre* no practicable. A. Peyron informó a Le Corbusier de que el médico supervisor de la Ciudad del Refugio había reconocido que las temperaturas eran extremadamente altas, entre 30-33 °C, y había una falta de renovación del aire.

En septiembre de 1934 [1, Carta 11], nueve meses después de la inauguración, Le Corbusier se puso en contacto con G. Lyon para informarle de los problemas del edificio respecto a las *roomettes*, las habitaciones pequeñas destinadas a madres con hijos (51 de estas habitaciones había en el edificio). A pesar de que en ellas se impulsaba un caudal adecuado de 35 m³/h en invierno y 80 m³/h en verano, las mujeres se sentían sofocadas y disconformes con el funcionamiento del sistema de ventilación.

Como solución al problema de la ventilación, el Ejército de la Salvación solicitó a la empresa "Construction Métallique Moderne" la apertura de 50 ventanas y la sustitución del circuito interior de ventilación, con el aire previamente filtrado y calentado, por rejillas de ventilación directas al exterior. Le Corbusier, ante tal situación, reclamó un aplazamiento de la apertura de ventanas a la empresa encargada de su ejecución [14].

Como consecuencia de la inspección realizada en enero de 1935 por los Servicios Técnicos de la Prefectura del Sena, se denunciaron las infracciones que se habían producido en la Ciudad del Refugio: las habitaciones de los niños mantenían unas altas concentraciones de CO₂ y alcanzaban temperaturas entre 27-28 °C. En vista de ello, Le Corbusier pidió un segundo informe que verificara el correcto funcionamiento del sistema. Sin embargo, en marzo de 1935, el segundo oficial de la Prefectura del Sena ordenó que en 45 días se hicieran operables todas las ventanas del edificio.

Los técnicos de la Prefectura del Sena volvieron a realizar unas mediciones en mayo de 1935 [1, Carta 17] demostrando que las concentraciones de ácido carbónico eran normales en aquellas habitaciones que

estaban desocupadas, entre 45-64 l/m³ con valores cercanos a los 40 l/m³ en el exterior. En cambio, estas concentraciones se elevaban en las grandes salas con alta densidad de ocupación, llegando a los 272 l/m³ (Fig. 37). Aseguraban que esas altas concentraciones de contaminantes interiores en parte se debían a la falta de apertura de ventanas, que impedía la entrada inmediata de aire limpio hacia el interior, así como a la falta de un sistema de refrigeración [1, Carta 18].

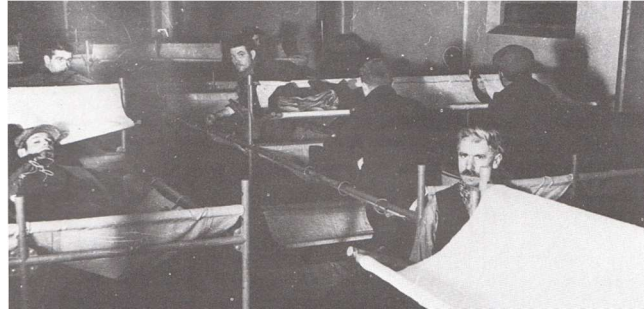


Figura 37. Habitación de gran ocupación destinada a los hombres.

Le Corbusier, como justificación al informe citado de esos técnicos, destacó que parte del problema era producto del pobre funcionamiento del sistema de ventilación, añadiendo que esas altas concentraciones de ácido carbónico y el incremento de temperaturas se podrían resolver aumentando la velocidad del aire de 1 a 3 m/s en aquellas habitaciones de mayor ocupación, y permitiendo la entrada de un mayor caudal de aire exterior por cubierta. En cuanto a la imposibilidad de abrir las ventanas, recordaba que era una medida de control para evitar la entrada de contaminantes en el interior y de aire extremadamente caliente o frío del exterior.

No obstante, Le Corbusier contacta con J. Renaults, médico del Hospital Saint Louis de París, quién había realizado un "Centro de cuidado de niños" dotado de un sistema de climatización. En su respuesta J. Renaults, en consonancia con las propuestas de Le Corbusier, señala que una tasa de 3 renovaciones/h·m³, junto a la hermeticidad de la fachada sur que impedía la entrada de polvo y contaminantes exteriores, garantizaba una adecuada calidad del aire interior, ya que la impulsión de aire exterior estaba previamente filtrado [15]. Por ello, Le Corbusier, pese a la insistencia de la apertura de huecos, propone utilizar el dinero destinado a la operatividad de las ventanas en un sistema de refrigeración que permitiera disminuir las temperaturas en las habitaciones de los niños, propuesta que no sería llevada a cabo.

En enero de 1936, Le Corbusier contrató a un tribunal de expertos acreditados para realizar un nuevo informe. El resultado del mismo sobre la ventilación en los dormitorios fue que su funcionamiento en invierno era correcto. En cambio, en verano, el aire exterior carecía de un sistema de refrigeración. Para favorecer esa refrigeración por vía pasiva, ese tribunal aconsejó perforar una fila de 60 aperturas de dimensiones de

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

4 x 1 cm, a dos tercios de la altura de la fachada acristalada en cada uno de los cinco niveles del *pan de verre*. Estas aperturas permanecerían cerradas en invierno y permitirían la circulación del aire en verano. De esta manera se podría evitar hacer practicables las ventanas [6].

En junio de 1937 Le Corbusier contacta con la empresa “M.M.M.”, la misma que había ejecutado el *pan de verre*, para que le hicieran una estimación del coste de un nuevo sistema de ventanas practicables: ventanas correderas de 0.90 m de ancho para colocarlas en el tercio superior de la superficie acristalada de cada planta.

Todas estas propuestas de modificación del gran ventanal de la fachada sur de la Ciudad del Refugio parisina se vieron paralizadas por la II Guerra Mundial. El 25 de agosto de 1944 [16] los alemanes hicieron estallar una bomba enfrente del edificio, haciendo desaparecer su fachada (Fig. 38-39). Le Corbusier, ante tal destrozo, evitó que cualquier otro arquitecto interviniera en su obra, y se ofreció a repararla sin costo por su parte. Fue entonces cuando, en abril de 1948 [1, Carta 19], C. Pean, del Ejército de la Salvación, le concedió reparar la fachada, pero fijando unas condiciones para su intervención. En ningún caso la fachada podría ser como la original, estableciéndose que, en cada planta, una primera franja de 1,10 m de altura fuese de material sólido, una segunda franja la constituyesen ventanas fijas permanentemente cerradas y una tercera franja fuesen ventanas practicables para permitir la ventilación natural. Le Corbusier aceptó la propuesta e incorporó además un brise-soleil en la fachada sur, formado por una estructura de hormigón con aletas laterales y voladizos de iguales dimensiones (Fig. 40-41) [17]. Finalmente, en 1952 [6 Carta 21], también se hicieron practicables las ventanas que formaban parte de la segunda franja, dando por terminada su construcción.



Figura 38. Fachada antes de la II GM. 1933.



Figura 39. Fachada después de la II GM. 1944.



Figura 40. Fachada este sin brise-soleil. 1954.



Figura 41. Fachada sur con brise-soleil. 1954.

5.2. Modelos numéricos

Un tipo de sistema de fachadas activas lo constituye la denominada Active Transparent Façade (ATF), grupo al que pertenece la solución de fachada propuesta por Le Corbusier para la Ciudad del Refugio de París, en este caso con doble acristalamiento. A partir del modelo matemático que desarrollan Ismail et al. [18-19], por un lado, y Liu et al. [20], por otro, para la transferencia de calor en este tipo de fachadas, en esta tesis se proponen dos modelos numéricos: uno primero en 1D, para valorar el comportamiento térmico de una ATF con doble acristalamiento con cámara de aire intermedia por la que circula aire de manera forzada, que fue la solución propuesta por Le Corbusier para la fachada del citado edificio parisino; y otro modelo 2D, que se mejora posteriormente con un modelo 3D, para la distribución de temperaturas en el interior de la habitación de estudio.

En este tipo de fachadas, el incremento de caudal de aire en la cámara intermedia reduce el efecto de la ganancia total de calor en comparación con una ventana de vidrio sencillo. Ismail et al. [21], en una segunda publicación, proponen un modelo transitorio en 2D, formulado a través de las ecuaciones fundamentales de conservación de masa y de energía asociado a la variación de tiempo y a la variación de condiciones de contorno, obteniendo resultados de las temperaturas a lo largo y a través de la cámara de aire con circulación forzada de aire. Liu et al. [20] desarrollan un método de cálculo simplificado para las fachadas de doble acristalamiento mediante un modelo 1D para calcular su rendimiento energético y de confort. Mediante comparación con un software WIS (Window Information System), más complejo, los resultados del método simplificado mostraron un alto nivel de precisión para evaluar la temperatura de la superficie interna del acristalamiento durante todo el año.

Como alternativa a los modelos propuestos por estos investigadores, en esta tesis se presentan sendos modelos numéricos propios elaborados mediante programación con el software libre FreeFem++. Esta herramienta es capaz de adquirir todo tipo de formulación y variables para valorar el comportamiento térmico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Con las simulaciones realizadas con estos códigos podemos conocer la evolución de la temperatura tanto en el propio muro neutralizante como en el interior de la habitación colectiva en la planta primera de la Ciudad del Refugio de París (Fig. 42), para la que Le Corbusier hizo su propuesta, con el fin principal de valorar su idoneidad. En ambos se combina la solución de fachada de muro neutralizante con la respiración exacta, lo que supone una novedad en los estudios realizados hasta la fecha sobre el comportamiento térmico y energético de las ATF.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

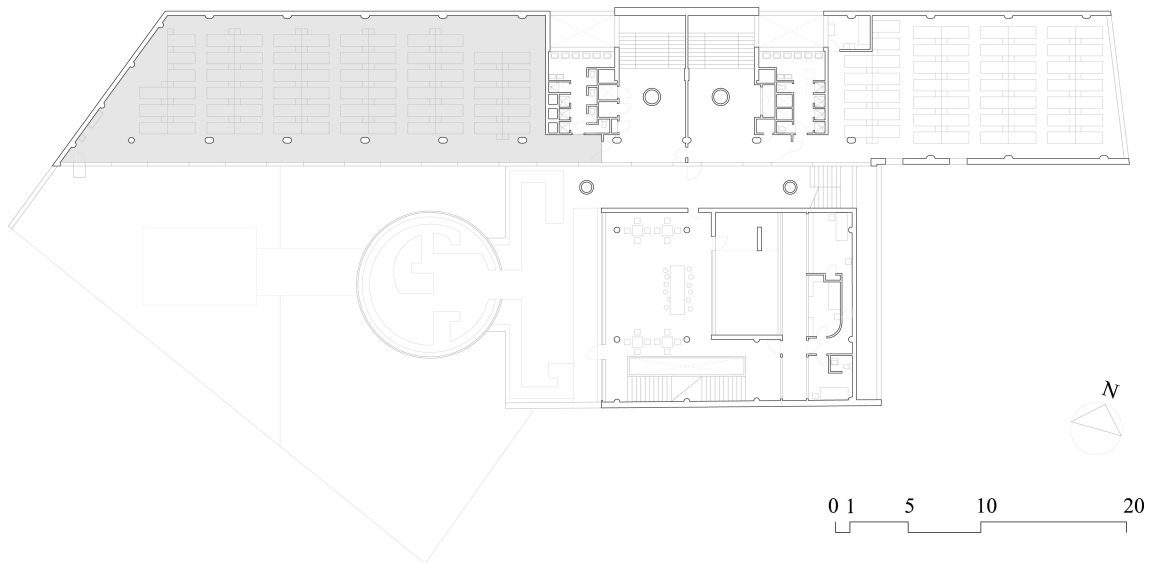


Figura 42. Planta primera de la Ciudad del Refugio.

5.2.1. Propuesta de un modelo numérico simplificado: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (2D)

5.2.1.1. Modelo acoplado para el problema de evolución de la temperatura interior (problema 2D)

En esta sección se define el modelo matemático propuesto para resolver el problema de la evolución de la temperatura. El objetivo es evaluar el efecto combinado del muro neutralizante y la respiración exacta en la distribución de temperaturas en la habitación de estudio. Como se mencionó anteriormente, el problema se divide en dos sistemas físicos: problema 1D para abordar el muro neutralizante, y problema 2D para evaluar la temperatura interior. La Figura 43 muestra un diagrama del funcionamiento del problema acoplado. A cada paso de tiempo, hasta el tiempo final de la simulación t_f , es necesario resolver primero el problema 2D y obtener la temperatura interior, T_{int} . A continuación, estos datos son utilizados para resolver el problema 1D, cálculo de la temperatura del vidrio interior, T_{ig} , el cual está incorporado dentro del problema 2D como una condición de contorno. En los siguientes apartados se detallan las aproximaciones numéricas de los modelos 1D y 2D.

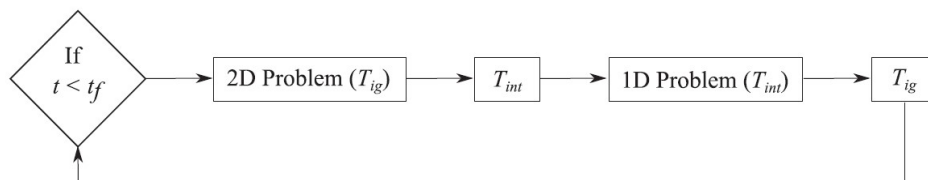


Figura 43. Diagrama de operación del modelo acoplado de los problemas 1D y 2D.

Evolución de la temperatura interior

La evolución de la temperatura interior se aborda a través de las incógnitas del campo de velocidad, a través de la solución del problema de Navier-Stokes, y la incógnita de la temperatura mediante la solución de un problema de convección-difusión. Para ello, se han tenido en cuenta las siguientes determinaciones: la densidad del aire es considerada constante y el flujo incompresible; el dominio de estudio Ω está determinado por los contornos Γ_i ($i = 1; \dots, M$), representados en la figura 44, donde la temperatura inicial del vidrio interior está localizada en la frontera Γ_1 . La frontera Γ_3 representa la entrada de aire de la respiración exacta y los límites restantes corresponden con los muros interiores. El modelo matemático se escribe como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \nabla \cdot (v \nabla \vec{u}) + \nabla p = \vec{g} \text{ en } \Omega \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \text{ en } \Omega \\ \vec{u} = (-u_{in}, 0) \text{ en } \Gamma_3 \\ \vec{u} = (0, 0) \text{ en } \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_4 \dots \cup \Gamma_M \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T - \kappa \Delta T = \varphi \text{ en } \Omega \\ T = T_{ig1d(m)} \text{ en } \Gamma_1 \\ T = T_{extef} \text{ en } \Gamma_3 \\ T = T_{rad} \text{ en } \Gamma_2 \cup \Gamma_4 \dots \cup \Gamma_M \end{array} \right. \quad (1)$$

que se complementa con las condiciones iniciales:

$$T(0) = T_{op} \text{ en } \Omega$$

$$\vec{u}(t = 0) = \vec{u}^0$$

Donde: \vec{u} , campo de velocidad; T , temperatura; $v = \mu/\rho$, viscosidad cinética; p , presión; \vec{f} , densidad de calor debido a la radiación; κ , coeficiente de difusión térmica; φ , fuente térmica debido a la ocupación.

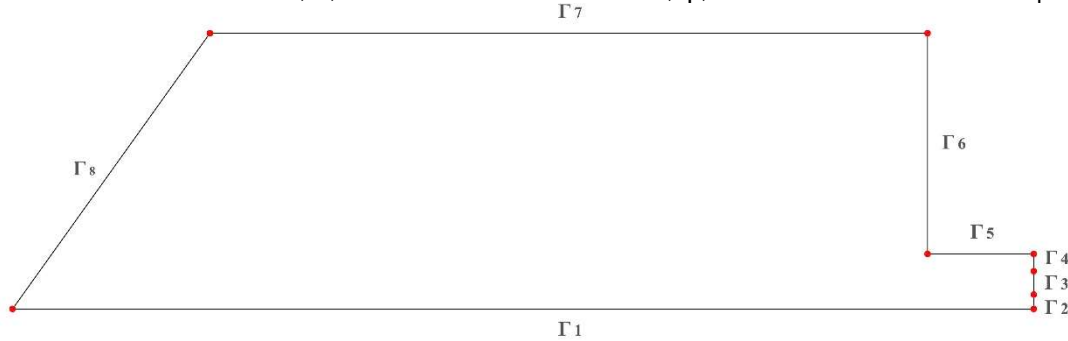


Figura 44. Determinación de fronteras dentro del dominio de la habitación de estudio.

Las notaciones para las diferentes condiciones de contorno son las siguientes: T_{ig1d} es la temperatura del vidrio interior, impuesta en la frontera Γ_1 . Este valor es obtenido mediante el promedio de la temperatura obtenida en el vidrio interior en el problema 1D, como se expone en la siguiente sección. T_{rad} es la temperatura radiante de los muros de la habitación. Estos muros son designados como $\Gamma_2, \Gamma_4, \dots, \Gamma_M$, siendo consideradas las caras internas de los muros como fronteras. Por tanto, es posible imponer diferentes

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

temperaturas radiantes en cada una de ellas. La frontera Γ_3 es usada para simular la entrada de caudal de aire de la respiración exacta, con velocidad u_{in} y temperatura T_{extef} . Finalmente, T_{op} es la temperatura inicial de la habitación sobre el dominio Ω .

La aproximación numérica de este problema fue llevada a cabo usando elementos finitos de tipo $\mathbb{P}_2 - \mathbb{P}_1$. El software FreeFem++ ha sido usado como aplicación informática.

5.2.1.2. Modelo del muro neutralizante (problema 1D)

El muro neutralizante

El problema es considerado como un sistema compuesto por dos hojas de vidrio de 7 mm de espesor, de altura $L = 3.0$ m, separadas por una cámara de aire intermedia activa de ancho $W = 0.10$ m. En la figura 45 se esquematizan los fenómenos y parámetros que afectan al incremento de temperaturas, principalmente provocados por la radiación solar incidente sobre la fachada acristalada. Para ello se ha considerado la radiación solar como la suma de la cantidad de energía procedente del sol de forma directa, difusa y reflejada, así como de los fenómenos de convección y de flujos de calor.

En la formulación del problema se han tenido en cuenta las diferentes formas de transferencia de calor consideradas, según los datos correspondientes con el vidrio empleado en nuestro caso de estudio. El vidrio exterior recibe el 100% de la radiación solar incidente, de la cuales un 7% es reflejada hacia el ambiente exterior, y un 14% es absorbida por el vidrio exterior. El 79% de energía restante incide en el vidrio interior, donde un 7% se transmite a la cámara mediante reflexión y un 14% es absorbido por el vidrio interior. Por tanto, la transmisión energética total hacia el ambiente interior es un 58% de la radiación solar incidente. Por otro lado, es considerado el fenómeno de convección debido al calentamiento de los vidrios en las superficies hacia el exterior e interior, así como en las superficies de los mismos hacia la cámara de aire.

La parte superior e inferior de los extremos de los vidrios se han considerado adiabáticos, ya que la intención de Le Corbusier era prolongar la construcción del muro neutralizante desde la planta primera hasta la planta quinta. Las condiciones para los límites en contacto con el ambiente interior y el exterior son obtenidas a través del balance energético efectuado en la simulación mediante el programa DesignBuilder [22].

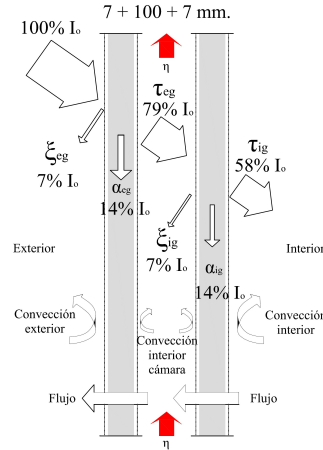


Figura 45. Fenómenos físicos en el muro neutralizante.

Modelo matemático y aproximación numérica

El problema está relacionado con la obtención de la temperatura en tres partes del muro neutralizante: T_f que indica la temperatura del fluido en el interior de la cámara, y T_{eg} y T_{ig} que representan las temperaturas del vidrio exterior e interior, respectivamente. El problema se resuelve mediante el siguiente sistema de ecuaciones en derivadas parciales:

$$\begin{cases} (\rho c V)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} = -\eta c \frac{\partial T_f}{\partial z} + U_c A (T_{eg} - T_f) + U_c A (T_{ig} - T_f) \\ (\rho c V)_{eg} \frac{\partial T_{eg}}{\partial t} = U_{ext} A (T_{ext} - T_{eg}) + U_c A (T_f - T_{eg}) + \sigma \epsilon_{eg} (T_{ext}^4 - T_{eg}^4) + \alpha_{eg} I_o + Q_{eg} \\ (\rho c V)_{ig} \frac{\partial T_{ig}}{\partial t} = U_{int} A (T_{int} - T_{ig}) + U_c A (T_f - T_{ig}) + \sigma \epsilon_{ig} (T_{int}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig} \end{cases} \quad (2)$$

con $z \in [0, L]$, siendo L la longitud del muro neutralizante y $t \in [t_0, t_M]$, el tiempo.

El modelo anterior (2) se puede representar como un sistema de ecuaciones en función de la derivada en tiempo de la temperatura del fluido y las de los vidrios de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \partial_t T_f = g_f(t, T_f, T_{eg}, T_{int}), \quad t \in [t_0, t_M] \quad z \in [0, L] \\ \partial_t T_{eg} = g_{eg}(t, T_f, T_{eg}, T_{int}) \\ \partial_t T_{ig} = g_{ig}(t, T_f, T_{eg}, T_{int}) \end{cases}$$

Donde:

$$\begin{cases} g_f(t, T_f, T_{eg}, T_{int}) = -\eta c \frac{\partial T_f}{\partial z} + U_c A (T_{eg} - T_f) + U_c A (T_{ig} - T_f) \\ g_{eg}(t, T_f, T_{eg}, T_{int}) = U_{ext} A (T_{ext} - T_{eg}) + U_c A (T_f - T_{eg}) + \sigma \epsilon_{eg} (T_{ext}^4 - T_{eg}^4) + \alpha_{eg} I_o + Q_{eg} \\ g_{ig}(t, T_f, T_{eg}, T_{int}) = U_{int} A (T_{int} - T_{ig}) + U_c A (T_f - T_{ig}) + \sigma \epsilon_{ig} (T_{int}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig} \end{cases} \quad (3)$$

Las incógnitas del problema son las funciones en tiempo y espacio:

$$T_f = T_f(t, z), \quad T_{eg} = T_{eg}(t, z), \quad T_{ig} = T_{ig}(t, z)$$

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Por tanto, la aproximación numérica comienza por definir una partición de las variables t y z independientes.

- Consideramos una partición uniforme en el intervalo $[t_0, t_M]$ con $M+1$ puntos considerados. Es decir, M subintervalos de longitud $\Delta t = \frac{t_M - t_0}{M}$, de modo que la partición se define como:

$$t_k = t_0 + k\Delta t, \quad k = 0, 1, \dots, M$$

- Una partición uniforme de intervalos en el espacio $[0, L]$ dado por los puntos considerados:

$$z_{i+1/2} = i\Delta z, \quad i = 0, \dots, n$$

siendo n el número de subintervalos en los que se divide el dominio $[0, L]$, es decir, $\Delta z = \frac{L}{n}$.

Para resolver el sistema se ha considerado un método semi-implícito de Euler en tiempo y una aproximación de tipo volúmenes finitos para la variable en espacio. Por lo tanto, la aproximación de las incógnitas en tiempo es t_k y en el volumen de control $[z_{i-1/2}, z_{i+1/2}]$ es:

$$T_{f,i}^k \approx \frac{1}{\Delta z} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} T_f(t_k, z) dz$$

Cuando se aplica el método de volúmenes finitos, la temperatura del fluido dentro de la cámara en el punto intermedio z_i es aproximado por el valor medio en el volumen de control, $T_{f,i}^{k+1}$.

La evolución en tiempo se combina con esta aproximación espacial mediante el uso del método semi-implícito de Euler descentrado, teniendo en cuenta la dirección del aire, siempre ascendente. La solución se obtiene a través del siguiente sistema:

$$\begin{cases} T_{f,i}^{k+1} = T_f^k + \Delta t g_{f,i}^{k,k+1} \\ T_{eg,i}^{k+1} = T_{eg}^k + \Delta t g_{eg,i}^k \\ T_{ig,i}^{k+1} = T_{ig}^k + \Delta t g_{ig,i}^k \end{cases}$$

Donde:

$$\begin{cases} g_{f,i}^{k,k+1} = -\eta c \frac{T_{f,i}^{k+1} - T_{f,i-1}^{k+1}}{\Delta z} + U_c A (T_{eg,i}^k - T_{f,i}^k) + U_c A (T_{ig,i}^k - T_{f,i}^k) \\ g_{eg,i}^k = U_{ext} A (T_{ext,i}^k - T_{eg,i}^k) + U_c A (T_{f,i}^k - T_{eg,i}^k) + \sigma \varepsilon_{eg} ((T_{ext,i}^k)^4 - (T_{eg,i}^k)^4) + \alpha_{eg} I_o^k + Q_{eg,i}^k \\ g_{ig,i}^k = U_{int} A (T_{int,i}^k - T_{ig,i}^k) + U_c A (T_{f,i}^k - T_{ig,i}^k) + \sigma \varepsilon_{ig} ((T_{int,i}^k)^4 - (T_{ig,i}^k)^4) + \alpha_{ig} I_o^k + Q_{ig,i}^k \end{cases}$$

Además, debe tenerse en cuenta la temperatura del aire en la condición de contorno del primer subintervalo espacial en la entrada de la cámara, siendo su valor $T_{f,0}^{k+1}$.

Método radiante

En esta sección presentamos el método radiante para determinar la transferencia de radiación neta de calor, $Q_{ig,i}$ y $Q_{eg,i}$, para una de las superficies con respecto a las otras superficies de la cámara activa.

El balance energético para una superficie i con área A_i es descrito como:

$$\frac{Q_i}{A_i} = J_i - G_i \quad (4)$$

donde J_i es la ratio de energía radiante que sale de la superficie, y G_i es la ratio de irradiación recibida por la superficie. Estos son determinados de la siguiente manera:

- G_i es la irradiación neta recibida que es calculada como la suma de los factores de forma F_{ij} entre el punto z_i del vidrio exterior y el punto z_j del vidrio interior:

$$G_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} \quad (5)$$

- El factor de forma para dos hojas paralelas de vidrio, F_{ij} , puede ser deducido a través del fenómeno representado en la figura 45, que conduce a la expresión (6):

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (6)$$

$i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, n$

Donde:

- r es la distancia de separación entre el punto medio de cada partición horizontal n del vidrio exterior (puntos i) respecto a cada punto medio de cada partición horizontal n del vidrio interior (puntos j) (Fig. 46).
- ϕ_i es el ángulo formado entre la normal de cada partición del vidrio exterior i respecto al segmento de longitud r , que lo une con la partición j del vidrio interior.
- ϕ_j es el ángulo formado entre la normal de cada partición del vidrio interior j respecto al segmento de longitud r , que lo une con la partición i del vidrio exterior.
- A_i es el área de cada superficie i .

Dada la geometría del problema, se puede ver que $\phi_i = \phi_j$ y que el área de las particiones son iguales a Δz . Por tanto,

$$F_{ij} = \frac{\Delta z (\cos \phi_i)^2}{\pi r^2}$$

Por otra parte, el factor de forma puede ser expresado explícitamente en términos de dimensiones espaciales. Si la definición de los puntos medios es $y_0 = i - \frac{1}{2}\Delta z$ e $y_1 = j - \frac{1}{2}\Delta z$ entonces:

$$r = \sqrt{W^2 + (y_1 - y_0)^2}$$

donde W es la distancia entre las dos hojas de vidrio.

Esto da lugar a $\cos \phi_i = \frac{W}{r}$ y, finalmente:

$$F_{ij} = \frac{\Delta z (\cos \phi_i)^2}{\pi r^2} = \Delta z \frac{W^2}{\pi r^4}$$

(7)

Por otro lado, J_i es la ratio de energía radiante que sale de cada superficie por unidad de área. Esto se define en términos de propiedades físicas de los diferentes tipos de vidrios en la emisividad (ε), la constante de Stefan-Boltzman (σ) y la densidad (ρ) mediante la siguiente relación:

$$J_i = \varepsilon \sigma T_i^4 - \rho_i G_i \quad (8)$$

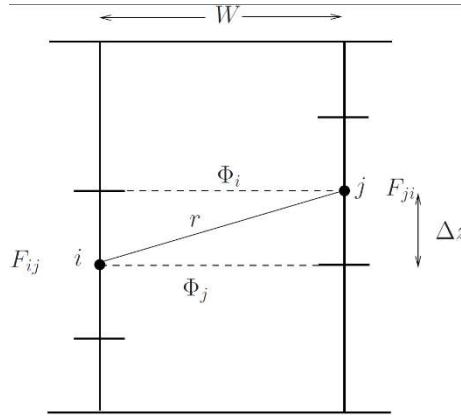


Figura 46. Factor de forma entre los dos paneles de vidrio del muro neutralizante.

La cámara activa del muro neutralizante se define por dos paneles verticales paralelos con un gradiente de temperatura a lo largo de sus superficies. Dividiendo cada hoja en n segmentos iguales, como fue hecho para el vidrio interior y exterior, se ha asumido que cada segmento es una superficie isotérmica de la cámara, para un total de $2n$ superficies.

Para el cálculo de la transferencia de calor por radiación en las superficies de la cámara es necesario aplicar la ecuación anterior para cada una de las n particiones de las dos hojas del vidrio. En la siguiente ecuación se detalla la cantidad de intercambio de calor por radiación entre cada punto i (para $i = 1; \dots, n$) de la superficie interior del vidrio exterior y la superficie interior $n+1$ a $2n$ del vidrio interior y viceversa:

$$\begin{cases} J_i = \varepsilon \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=n+1}^{2n} F_{ij} J_j, & i = 1, \dots, n \\ J_i = \varepsilon \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^{n} F_{ij} J_j, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (9)$$

Este sistema lineal se resuelve con las incógnitas $\vec{x} = \{J_i\}_{i=1}^{2n} \in \mathbb{R}^{2n}$ que se expresa de forma matricial como:

$$A\vec{x} = \vec{b}$$

con $A \in \mathcal{M}_{2n \times 2n}$, $\vec{b} \in \mathbb{R}^{2n}$ dado por, $A = \begin{pmatrix} I & A_{12} \\ A_{21} & I \end{pmatrix}$, $\vec{b} = \{\varepsilon_i \sigma T_i^4\}_{i=1}^{2n}$

La matriz $I \in \mathcal{M}_{n \times n}$ representa la matriz identidad de dimensión n y las matrices $A_{12} \in \mathcal{M}_{n \times n}$, $A_{21} \in \mathcal{M}_{n \times n}$, se definen de la siguiente forma:

$$A_{12} = \begin{pmatrix} (\varepsilon_1 - 1)F_{1,n+1} & (\varepsilon_1 - 1)F_{1,n+2} & \dots & (\varepsilon_1 - 1)F_{1j} & \dots & (\varepsilon_1 - 1)F_{1,2n} \\ (\varepsilon_2 - 1)F_{2,n+1} & (\varepsilon_2 - 1)F_{2,n+2} & \dots & (\varepsilon_2 - 1)F_{2j} & \dots & (\varepsilon_2 - 1)F_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\varepsilon_i - 1)F_{i,n+1} & (\varepsilon_i - 1)F_{i,n+2} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{ij} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{i,2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varepsilon_n - 1)F_{n,n+1} & (\varepsilon_n - 1)F_{n,n+2} & \dots & (\varepsilon_n - 1)F_{nj} & \dots & (\varepsilon_n - 1)F_{n,2n} \end{pmatrix},$$

$$A_{21} = \begin{pmatrix} (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{1,n+1} & (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,2} & \dots & (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,j} & \dots & (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,n} \\ (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{2,n+1} & (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,2} & \dots & (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,j} & \dots & (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\varepsilon_i - 1)F_{i,1} & (\varepsilon_i - 1)F_{i,2} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{ij} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,1} & (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,2} & \dots & (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,j} & \dots & (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,n} \end{pmatrix},$$

Modelos numéricos

En primer lugar, los modelos son validados mediante comparación con los resultados obtenidos en Ismail et al. [21], y para ello se toman los mismos valores para las condiciones de contorno y condiciones climáticas del mismo. Una vez descritas las características del modelo predictivo, se compara la evolución de la temperatura de la superficie del vidrio interior en una posición de altura media ($T_{ig,zmed}$) y la transferencia de calor (q_{total}) definido de la siguiente forma:

$$q_{total} = \Delta x \sum_{j=1}^n U_{int}(T_{int} - T_g) + \Delta x U_c(T_f - T_{ig}) + \Delta x \sigma \varepsilon_{ig}(T_{int}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig} \quad (10)$$

Los resultados obtenidos con la solución numérica de este modelo, en primer lugar, muestra el mismo comportamiento que los obtenidos por Ismail et al. [21] y, en segundo lugar, los valores obtenidos coinciden con los del modelo predictivo.

A continuación, aplicamos el modelo a la habitación de estudio de la Ciudad del Refugio, para analizar la temperatura y la ganancia total de calor, q_{total} .

5.2.2 Propuesta de un modelo numérico complejo: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (3D)

Modelo 3D CFD y modelo ATF

Para resolver el problema completo de las ATF con la resolución de la termodinámica dentro de la habitación, en este apartado se completa el modelo incluyendo una formulación 3D más compleja con interacciones entre la fachada y el espacio interior. Sin embargo, hay algunas formas de simplificar los cálculos numéricos sin pérdidas generales importantes, ya que se pretende trabajar con un modelo que sea preciso en los cálculos y no demasiado costoso desde el punto de vista computacional.

El problema se ha dividido en dos sistemas. El primero implica el cálculo de la distribución de la temperatura dentro de la habitación adyacente a la ATF (P_{room}), mientras que el segundo resuelve el problema térmico dentro de la fachada ($P_{\text{façade}}$). El acoplamiento natural entre estos dos sistemas afecta a las condiciones térmicas que van a ser definidas a continuación.

En cuanto al problema dentro de la habitación, \vec{u} es usado para denotar el campo de velocidad 3D, p es la presión y T la temperatura. Así, el modelo sigue siendo un acoplamiento de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles y una ecuación de convección-difusión para la temperatura. Si se considera la densidad del aire constante, ρ_a , podemos escribir el sistema de la siguiente forma:

$$(P_{\text{room}}) \left\{ \begin{array}{ll} \rho_a \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) - \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \nabla p = \rho_a \vec{g} & \text{en } \Omega \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 & \text{en } \Omega \\ \vec{u} = (0,0,0) & \text{en } \Gamma_1 \cup \Gamma_3 \\ \vec{u} = (-u_{in}, 0,0) & \text{en } \Gamma_2 \\ \vec{u}(t=0) = \vec{u}^0 & \\ \rho_a c_a V_r \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T - \kappa \Delta T \right) = \dot{E} & \text{en } \Omega \\ \rho_a c_a \kappa \frac{\partial T(t)}{\partial \vec{n}} = U_{in}(T(t) - T_{il}(t)) & \text{en } \Gamma_1 \\ T = T_{in} & \text{en } \Gamma_2 \\ \frac{\partial T(t)}{\partial \vec{n}} = 0 & \text{en } \Gamma_3 \\ T(t=0) = T^0 & \end{array} \right. \quad (11)$$

La primera de las dos ecuaciones en este problema resuelve la dinámica del aire en la habitación, donde μ es la viscosidad dinámica del aire y $\vec{g} = (0,0,-g)$ la aceleración de la gravedad. La segunda ecuación de convección-difusión proporciona la temperatura para la habitación, donde c_a es el calor específico del aire, V_r el volumen de la habitación, κ el parámetro de difusión térmica del aire, y \dot{E} representa la carga de calor total. El tiempo es denotado por t . Las condiciones iniciales se indican con el superíndice 0 para velocidad, presión y temperatura. La frontera Γ_1 representa el vidrio interno de la fachada; Γ_2 corresponde

en este problema a la rejilla de ventilación; y los restantes paramentos son Γ_3 . Para la rejilla de ventilación se imponen unas condiciones de entrada de velocidad y de temperatura.

La interacción de la habitación con la ATF se tiene en cuenta en las condiciones de contorno del problema (P_{room}). Cabe destacar que la capa interna Γ_1 es una superficie común en ambos sistemas. La influencia de T , la temperatura interior de la habitación, en la evolución de la temperatura de la capa interna T_{il} ya se ha tenido en cuenta en la ecuación dinámica para cada momento t (ecuación (13)) en el problema de la fachada ($P_{façade}$). Sin embargo, la influencia de la temperatura de esta pared sobre la temperatura dentro de la habitación, en el problema (P_{room}), se impone a través de una condición de contorno dependiente del tiempo:

$$\left. \frac{\partial T(t)}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma_1} = U_{il} (T(t) - T_{il}(t)) \quad (12)$$

Esta condición es aplicada para cada instante de tiempo t , donde \vec{n} es el vector normal exterior a la frontera interna Γ_1 y U_{il} es la transmitancia de la capa interna.

Finalmente, se considera una condición de contorno libre para el resto de las paredes Γ_3 , esto es, la temperatura de estos parámetros evoluciona de acuerdo con la temperatura de la habitación.

El problema térmico en la fachada puede ser reducido a un modelo simplificado 1D sin pérdidas significativas en el marco de trabajo. El comportamiento de la fachada activa es asumido de forma uniforme longitudinalmente; nos centramos, por tanto, en una sección perpendicular al muro, manteniendo los componentes de verticalidad y profundidad (ecuación (13)). De este modo, se resuelve la evolución en el tiempo de las temperaturas acopladas en el sistema de fachada activa (muro exterior, cámara de aire y muro interior). Las ecuaciones para resolver este sistema implican el cálculo de las tres temperaturas, la de la capa externa T_{el} , capa interna T_{il} y la temperatura del aire dentro de la cámara, T_a . En los diferentes parámetros se han utilizado los siguientes subíndices para referirse a la capa exterior 'el', a la cámara de aire 'a', y a la capa interna 'il'. El sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$(P_{façade}) \left\{ \begin{array}{l} (\rho c V)_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = -\eta c V \frac{\partial T_a}{\partial z} + U_a A (T_{el} - T_a) + U_a A (T_{il} - T_a) \\ (\rho c V)_{el} \frac{\partial T_{el}}{\partial t} = U_{el} A (T_{out} - T_{el}) + U_a A (T_a - T_{el}) \\ \quad + \sigma \varepsilon_{el} A (T_{out}^4 - T_{el}^4) + \alpha_{el} A I_o + A \tilde{Q}_{el} \\ (\rho c V)_{il} \frac{\partial T_{il}}{\partial t} = U_{il} A (T - T_{il}) + U_a A (T_a - T_{il}) \\ \quad + \sigma \varepsilon_{il} A (T^4 - T_{il}^4) + \alpha_{il} \tau_{el} A I_o + A \tilde{Q}_{il} \\ T_a = T_{imp} \quad \text{en } z = 0 \\ \frac{\partial T_a}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = L \\ T_a(t = 0) = T_a^0 \\ T_{el}(t = 0) = T_{el}^0 \\ T_{il}(t = 0) = T_{il}^0 \end{array} \right. \quad (13)$$

Con $z \in [0, L]$, L la altura del muro y T la temperatura dentro de la habitación (Tabla 1). Las condiciones iniciales para cada temperatura se denotan como antes por el superíndice 0. En el problema de la fachada, el sistema activo es incluido a través de las condiciones de contorno representados por el caudal de impulsión en la cámara. Se impone la temperatura del caudal de aire T_{imp} en la base de la cámara ($z = 0$) y una condición de contorno libre en la parte superior ($z = L$).

ρ	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
c	Calor específico $\left[\frac{J}{kg K}\right] = \left[\frac{Ws}{kg K}\right]$
V	Volumen $[m^3]$
η	Flujo másico en la cámara por unidad de área $\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$
U	Transmitancia $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
A	Área $[m^2]$
σ	Constante de Stephan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$
ε	Coefficiente de emisividad
α	Coefficiente de absorción
τ	Coefficiente de transmisión de energía
I_o	Radiación solar $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
\tilde{Q}	Transferencia de calor radiante neto por unidad de área $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
T_{out}	Temperatura exterior $[K]$
Subíndice	
a	Cámara de aire de la fachada
el	Capa externa de la fachada
il	Capa interna de la fachada

Tabla 1. Nomenclaturas en el problema ($P_{façade}$).

Se debe tener en cuenta que, dado que el volumen es $V_k = A \cdot w_k$, siendo w_k el espesor de la capa k ($k = a, el, il$), la única medida geométrica involucrada en este sistema es el espesor de cada capa. La transferencia de calor radiante neta por unidad de área $\tilde{Q}_k = \frac{Q_k}{A}$ es calculada como la diferencia entre la ratio de energía radiante que sale de la superficie por unidad de área J_k y la ratio de irradiación recibida por unidad de área G_k , es decir, $\tilde{Q}_k = J_k - G_k$.

La aproximación numérica del problema (P_{room}) es llevada a cabo usando los elementos finitos de tipo $\mathbb{P}_2 - \mathbb{P}_1$ y se resuelve, en este caso, con el software FreeFEM3D [23], la versión actual para cálculos 3D con el Método de Elementos Finitos del original Freefem++.

Modelo específico 3D

La habitación analizada tiene 37.2 m de longitud y 10 m de profundidad, con una altura de $L = 3$ m y con una ocupación de 67 camas. Tiene en su interior seis pilares dispuestos paralelamente a la ATF, situados a una distancia de ésta de 1.32 m, y separados entre ellos 4.75 m. La ocupación se tiene en cuenta a través de la definición de la carga de ocupación \dot{E} . Las camas no se han considerado en la generación de la malla de cálculo. Esa ATF sur ocupa todo el largo del muro de la habitación. En el caso del muro neutralizante, consiste en dos capas de vidrio de 7 mm de espesor y 3 m de alto, separadas por una cámara de aire de 10 cm.

En la figura 47 se muestra el dominio de estudio y la malla computacional formada por 20.739 tetraedros establecidos para presentar los resultados numéricos. No se ha considerado un modelo turbulento para las simulaciones, dado que el rango característico de la velocidad corresponde con un régimen laminar. La figura 48 muestra la habitación y los vectores de velocidad coloreados y escalados en función de la norma de la velocidad máxima en una simulación en verano. El valor de la velocidad máxima de entrada se impone a 3.55 m/s en verano. Se observa que la velocidad característica en la habitación es la de un régimen laminar (el número característico de Reynold es más bajo de 3.000). Sin embargo, en el código acoplado 3D CFD desarrollado también se puede aplicar en regímenes turbulentos, si las condiciones así lo requieren.

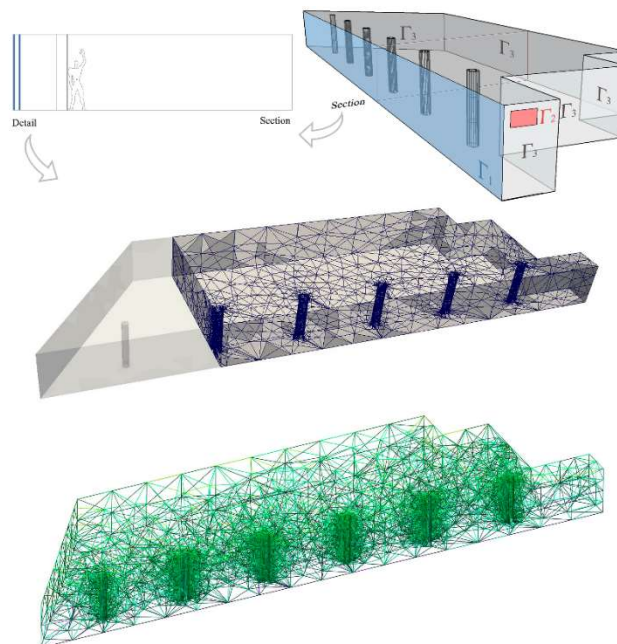


Figura 47. Modelado de habitación y fachada activa, ATF. Etiquetas de contornos para el problema (P_{room}) y detalle de la malla computacional.

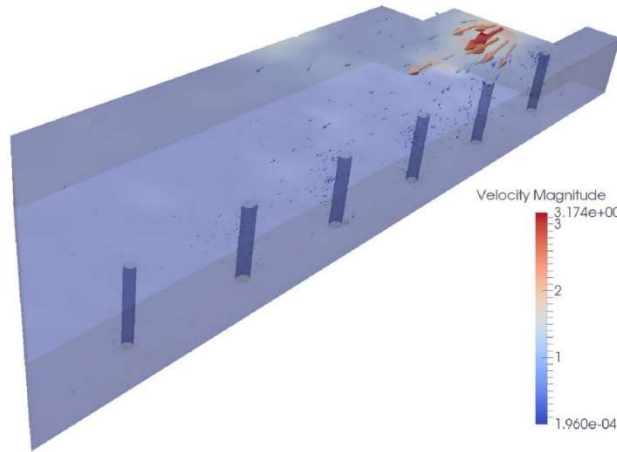


Figura 48. Habitación y vectores de velocidad coloreados y escalados en función de la norma de la velocidad máxima de entrada para el caso estudiado.

El principal propósito de esta fachada es actuar como una barrera para el espacio interior contrarrestando el clima exterior. En este sentido, la acción 'activa' consiste en suministrar aire acondicionado térmicamente a través de la cámara para calentar en invierno o enfriar en verano. Esto conlleva dos parámetros de diseño: temperatura de impulsión T_{imp} y caudal de impulsión dentro de la cámara en relación con la ratio de flujo másico η . Estos parámetros solo afectan al problema ($P_{façade}$). El problema de la fachada para la Ciudad del Refugio es estudiado considerando el sistema definido en la ecuación (13), siendo los valores de sus parámetros los de radiación y temperatura exterior I_o , T_{out} , junto con los datos iniciales de partida de invierno y verano.

El problema (P_{room}) es un poco más complejo y requiere la selección de parámetros adicionales. Los diferentes límites del dominio 3D están etiquetados en la figura 47. En particular, la ventilación mecánica es impulsada a la habitación a través de una rejilla en la pared (marcada como Γ_2 en rojo). Las condiciones de la rejilla de ventilación afectan tanto a la velocidad como al problema de las temperaturas, conocidos como condiciones de entrada y denotadas por el subíndice 'in'. Por lo tanto, los parámetros de diseño para el problema (P_{room}) son los de la temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} , la velocidad de entrada u_{in} y la localización y tamaño de la rejilla de ventilación.

Para los parámetros de techo, suelo y pilares se asumen condiciones de frontera libre en flujos de Stokes. La superficie del vidrio interior (Γ_1) es considerada como superficie común entre el (P_{room}) y ($P_{façade}$) en la que se establece una condición de contorno en cada instante de tiempo, tal como se describe en la ecuación (12) y que, a su vez, depende de la transmitancia U_{il} y la temperatura del vidrio interior de la fachada T_{il} . En particular, como hemos mencionado anteriormente, la temperatura T_{il} es un dato proveniente del problema 1D ($P_{façade}$) y que se actualiza por tanto, en cada instante de tiempo.

En el modelo completo 3D, dado por la ecuación (11), la viscosidad dinámica del aire es $\mu = 1.72 \times 10^{-5}$ kg/ms, la difusión térmica del aire $\kappa = 1.9 \times 10^{-5}$ m²/s y la aceleración de la gravedad $g = 9.81$ m/s². Los datos iniciales de temperaturas se especifican en la Tabla 2. La carga de ocupación dentro de la habitación aparece como término fuente en la ecuación de la temperatura de la habitación. Se calcula una ratio de 1 pers./ 4 m² y una carga energética por ocupante de 46 W; resultando: $\dot{E} = 3450$ W, que se aplica desde las 18:00 h a las 08:00 h para cada día.

Data	Winter	Summer
T_{el}^0 (°C)	-0.58	18.13
T_a^0 (°C)	2.48	20.26
T_{il}^0 (°C)	4.45	21.51
\vec{u}^0 (m/s)	0	0
p^0 (N/m ²)	0	0
T^0 (°C)	7.14	27.58

Tabla 2: Datos iniciales para los problemas (P_{room}) y ($P_{façade}$).

1 Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. London: The University of Chicago Press.

Carta 2

1 Agosto 1929

“Carta del comisario Albin Peyron a Le Corbusier”

Carta 3

11 Octubre 1930

“Carta de Le Corbusier al comisionario Albin Peyron”

Carta 6

30 Julio 1931

“Carta de A. J. Benwell, secretario general del Ejército de la Salvación, a Le Corbusier”

Carta 10

20 Septiembre 1934

“Carta de Le Corbusier a Gustave Lyon”

Carta 11

9 Noviembre 1934

“Carta de Le Corbusier a Colonel Isley de la Armada de la Salvación”

Carta 12

13 Noviembre 1934

“Carta de Le Corbusier al comisionario Albin Peyron”

Carta 15

29 Enero 1935

“Carta de Le Corbusier al comisionario Albin Peyron”

Carta 16

11 Mayo 1935

“Carta del Director del Plan de Paris de la Prefectura del Sena al Ejército de la Salvación”

Carta 17

- 11 Julio 1935
"Carta del Director del Plan de Paris de la Prefectura del Sena, Bureau d'Alignements, al director general de Bellas Artes del Ministerio de Educación"
- Carta 18
16 Octubre 1951
"Carta de Le Corbusier al Wycliffe Booth, jefe de la Armada de la Salvación"
- Carta 19
18 Diciembre 1951
"Carta de Le Corbusier al comisario de construcción del Ejército de la Salvación"
- 2 Brace Taylor, B. (1979). Technology, society, and social control in Le Corbusier's Cité de Refuge, Paris 1933. *Oppositions*, 16, 168-185.
- 3 Boesiger, W. (1999). *Le Corbusier et Pierre Jeanneret: oeuvre complete*. Vol 2, 1929-1934. Basel, Suiza: Birkhauser.
- 4 Fundación Le Corbusier. Disponible en: <http://www.fondationlecorbusier.fr> (2 Diciembre 2015).
- 5 Flora, S. (2007). *Le Corbusier in Detail*. Burlington: Architectural Press.
- 6 Taylor, B.B. (1979). *La Cité de Refuge di Le Corbusier, 1929/33*. Roma: Officina Edizioni.
- Carta 1
3 Mayo 1929
"Carta de Le Corbusier al comisario Albin Peyron"
- Carta 4
7 Febrero 1931
"Carta de Le Corbusier a Edouard Herriot"
- Carta 5
18 Mayo 1931
"Carta de Dr. Pierre Winter a Le Corbusier"
- Carta 7
3 Agosto 1931
"Carta de Le Corbusier al comisario Albin Peyron"
- Carta 8
24 Agosto 1931
"Carta del comisario Albin Peyron a Le Corbusier"
- Carta 9
27 Diciembre 1933
"Carta de la Armada de la Salvación a Le Corbusier"
- Carta 13
4 Diciembre 1934
"Carta de Le Corbusier a la Princesa de Polignac"
- Carta 14
12 Enero 1935
"Carta de Colonel Isely de la Armada de la Salvación a Le Corbusier"
- Carta 20
31 Julio 1952
"Carta de Le Corbusier a la hija del comisario Albin Peyron"
- Carta 21
12 Agosto 1952
"Carta del comisario Albin Peyron a Le Corbusier"
- 7 Le Corbusier. (1983). *Armée du Salut, Cité de Refuge*. New York: Garland Publishing.

-
- 8 Decreto del 13 de Agosto de 1902, Artículo 2 y 43 En cuanto a los reglamentos de las alturas de los edificios en la ciudad de París.
 - 9 Taylor, B.B. (1985). Aria nuova in rue Cantegrel. *Avery Index to Architectural Periodicals*, Vol. 7, 24, 42-54.
 - 10 Goode, T. (1988). Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-1933 Brian Brace Taylor. *Avery Index to Architectural Periodicals*, Vol.18, 1, 15-16.
 - 11 Saint Gobain. Disponible en: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/SP/index.asp?nav1=AU&nav2=AUSM> (13 Septiembre 2014).
 - 12 R.L. (1933). La maison de verre de MM. Le Corbusier et Jeanneret et le muro neutralizante. *Glaces et Verres*, Vol. 20, 10-12.
 - 13 Le Braz. J. (1933). La transmission de la chaleur grèveâ travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Revista Glaces et Verres*, Vol. 20, 12-18.
 - 14 James Inglis. D. (1988). Le Corbusier's test-bed: Le Corbusier: the City of Refuge, Paris 1929-33, by Brian Brace Taylor, with introduction by Kenneth Frampton [book review]. *Avery Index to Architectural Periodicals. Architects' journal*, Vol.188, 37, 99.
 - 15 Taylor, B.B. (1981). Restoration is not salvation: Cité de Refuge, Paris. *Avery Index to Architectural Periodicals. Progressive architecture*, Vol. 62, 11, 116-119.
 - 16 Robertson, H. (1934). The Salvation Army Cité-Refuge, Paris, architects Le Corbusier & Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals. Architect and building news*, Vol.137, 2, 165-169.
 - 17 René Lévy. Cl. (1934). Cité de refuge de l'armée du salut, rue Cantagrel et rue deu Chevaleret, à Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals. Architecte*, Agosto, 43-44, 81-84.
 - 18 Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2003). Modeling and simulation of a simple glass window. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80, 355–374. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.08.010>
 - 19 Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2005). Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48. 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.022>
 - 20 Liu, M., Bjarne Wittchen, K., Kvols Heiselberg, P., Vildbrad Winther, F. (2014). Development and sensitivity study of a simplified and dynamic method for double glazing façade and verified by a full-scale façade element. *Energy and Buildings*, 68, 432–443. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.056>
 - 21 Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2006). Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, 26, 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.023>
 - 22 DesignBuilder. Disponible en: <http://www.designbuilder.es/descargas/software-designbuilder> (17 junio 2016).
 - 23 FreeFEM3D. Disponible en: <http://www.freefem.org/ff3d/> (25 Julio 2017).

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

6. Propuestas innovadoras de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de edificios: Ciudad del Refugio en París

Nombre y adscripción de autor y coautores.

Future technologies in Le Corbusier's environmental conditioning systems: City of Refuge in Paris.

Cristina Ramírez Balas, Rafael Suárez Medina, Juan José Sendra Salas.

Referencia completa de la revista o editorial de publicación.

PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany 10-12 September 2013; publicado en el libro Sustainable Architecture for a Renewable Future, editado por W. Lang, Center for Sustainable Building, Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building, München. Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-8167-9053.

6.1. Resumen

Son dos los objetivos principales de esta publicación: exponer los acontecimientos históricos más relevantes relativos al proyecto y construcción de las dos innovaciones tecnológicas, el muro neutralizante y la respiración exacta, en La Ciudad del Refugio en París; y efectuar una primera valoración sobre la influencia que, sobre el comportamiento térmico, supuso sustituir el muro neutralizante proyectado en la fachada sur del dormitorio colectivo por un *pan de verre*, solución finalmente ejecutada. El método utilizado para alcanzar este segundo objetivo es la simulación de modelos energéticos basada en la Dinámica de Fluidos Computacional.

La descripción de acontecimientos se extiende desde 1929, fecha en la que Le Corbusier, con la asesoría de Gustave Lyon, propone el muro neutralizante como sistema de acondicionamiento térmico, hasta 1952, fecha en la que el edificio se restaura, ya que una bomba lanzada durante la Segunda Guerra Mundial había destruido la fachada acristalada sur, haciendo practicable las ventanas e incorporando Le Corbusier el *brise soleil* como solución para la protección solar por el exterior. El hito fundamental en esta cronología es cuando, en 1931, se decide la sustitución del muro neutralizante, proyectado para la fachada sur del edificio, por un *pan de verre* de 7 mm de espesor, introduciendo como protección solar interior paneles que ofrecían la posibilidad de cerrarse, dejando una cámara de aire intermedia entre esos paneles y el vidrio. La ventilación mecánica no se ejecutó hasta 1933, el mismo año en el que empezaron las quejas de los usuarios del edificio por el sofocante calor de sus estancias, por la imposibilidad de abrir las ventanas, y por el deficiente funcionamiento de ese sistema de ventilación.

Los resultados de las simulaciones dinámicas de modelos energéticos han permitido hacer una primera valoración sobre lo que supuso para el comportamiento térmico del dormitorio principal, colectivo, la

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

sustitución del muro neutralizante por el citado *pan de verre* en la fachada sur. Con esta última solución, la finalmente ejecutada, el comportamiento térmico depende excesivamente de las condiciones exteriores, principalmente debido a la radiación solar, siendo en general favorable en invierno, pero desfavorable en verano, estación en la que es posible alcanzar unos 30 °C en el interior de la habitación, fuera pues del rango de confort, incluso considerando el efecto beneficioso que produce el sistema ejecutado de protección solar por el interior.

6.2. Publicación

PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany 10-12 September 2013

Future technologies in Le Corbusier's environmental conditioning systems: City of Refuge in Paris

C. RAMÍREZ-BALAS¹, R. SUÁREZ AND J.J. SENDRA

¹ Institute of Architecture and Building Science, University of Seville, Seville, Spain

ABSTRACT: *The City of Refuge in Paris (1929-30) is an experimental building where Le Corbusier wanted to apply his famous proposal of environmental conditioning systems of buildings through the combination of two technological advances that supported his concept of machine à habiter: the mur neutralisant and respiration exacte.*

This paper presents a historical journey from the first attempts to carry out these two technological innovations to a complete informative documentation on the major decisions and changes made in the City of Refuge by collecting letters and reports of the main actors who intervened in it. The aim of this study is to investigate environmental conditioning through passive and active strategies in Le Corbusier's architecture, carrying this study out in the year 2013, which marks the 50th anniversary of his death. The results and findings have allowed us to complete the analysis that architectural critics have produced on the City of Refuge, through understanding the real behaviour of the building as originally built, as well as the success that the combination of the mur neutralisant and the respiration exacte, advanced technologies for their time, could have had. At present these are once again being used in the design of active façades which deal with existing concerns about sustainability and energy efficiency.

Keywords: *Le Corbusier, mur neutralisant, respiration exacte, environmental conditioning systems, active façade systems.*

INTRODUCTION

The current solutions for active façades have their most interesting precedent in the technological innovations introduced by Le Corbusier in the first third of the twentieth century with the *mur neutralisant*, combined with *respiration exacte*, planned in the City of Refuge in Paris [1]. These innovations were only partially executed [2], and may have failed because they were burdened from the initial design stage, economically, and by the lack of simulation tools allowing relatively reliable prediction of indoor temperature.

The lack of interest in the integration of active systems into façades contrasted with progress in air conditioning systems for building occurring in the USA at that stage, an indubitable milestone in the development of climatisation technologies for modern architecture during the twentieth century [3]. Le Corbusier gained first-hand knowledge of these advances on his trip to the USA in 1935 [4] and adopted them [5]. He shared the interest of American engineers in the creation of artificial indoor atmospheres, healthy and free from pollution (including acoustic pollution), in airtight buildings, regardless of outdoor climate conditions [6].

It was 50 years before another great architect, N. Foster, came back in the late 1980s to the idea of the *mur neutralisant* in Duisburg Microelectronic Park, one of the earliest and most representative examples of Eco-Architecture [7], sharing the search for a more holistic

interpretation of architecture. This concept, incorporating the problems of environmental conditioning, led to modern active façade systems being proposed as solutions for environmental conditioning, leading to an increase in energy efficiency in buildings.

This paper has two main aims. The first is to offer a timeline of the events occurring in the City of Refuge in Paris, while the second is to compare the thermal behaviour of the City of Refuge, as it was constructed, with what it would have been had all the innovations introduced by Le Corbusier been executed. To do so, two energy models designed for the main dormitory of the City of Refuge (Fig. 1) have been defined, one corresponding to what was actually built and the other to what was planned, taking into account climate conditions, orientation, operational conditions, spatial characteristics and the material characteristics of the thermal envelope.

Fortunately, modern computer tools for energy and environmental simulation have enabled us to carry out this task. These have provided us with the conclusions which have expanded our knowledge of the design and development of modern active façade systems as well as of the system designed by Le Corbusier and the calculations obtained by physicist G. Lyon. These results were compared with those obtained from the solution that was finally used.

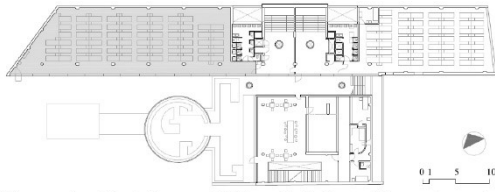


Figure 1: First floor of City of Refuge. Women's main dormitory with 289.5 m² of surface, 67 beds and 37.2 m of glass façade.

THE MUR NEUTRALISANT AND THE RESPIRATION EXACTE: DESCRIPTION OF THE ACTIVE FAÇADE SYSTEM

In the Modern Movement, from 1910 to 1930, a new relationship was constructed between architecture and energy, based mainly on the formal analogy of the machine, a two-fold aesthetic: that of the functional machine and that of the symbolic machine [8]. The progressive speeding up of construction processes and the incorporation of large sheets of glazing, along with the abandonment of traditional solutions, generated an unknown energy behaviour which was hard to control and required new energy strategies. The result was an architectural form increasingly foreign to climate conditions and a search for thermal homogeneity relying upon the implementation of powerful new industrial technologies, which entailed the mechanisation of the atmosphere and the creation of an artificial climate.

In this context, Le Corbusier represented the new and modern spirit of the 1920s, inventing new architectures and preceding future innovations and models, rehearsed in Le Corbusier's work from a perspective of contradiction and debate between scientific rigor and intuition [9]. In his architecture Le Corbusier adopted glass as a paradigm of modernity and attempted to satisfy the environmental demands of modern man through an architecture which aspired to be independent from climate, generating uniform thermal environments (*isothermiques*) through the sublimation of a technical and technological development which provided a universal architectural language.

Le Corbusier presented his proposals for technological innovations resulting from his mechanistic ideals, aiming for environmental control as defined in the Athens Charter in 1933. The development of Domino housing in 1914 allowed him to research new functions for building envelopes [10]. The solution of the *mur neutralisant* is based on an envelope with a double glass pane forming an inner chamber through which air, previously heated or cooled by the building's heating or cooling systems circulated. This was designed to reduce energy exchanges between indoors and outdoors through

the glazed openings [11]. The temperature of the air circulating through the chamber depended on outdoor temperature conditions.

Le Corbusier defined the solution of *respiration exacte* using an organic analogy, that of an arterial system of conduits which use ventilation and diffusers to force clean air indoors, and a vein system of conduits which equally uses ventilation to return polluted air from this indoor atmosphere and regenerate it. Although this system had been used by G. Lyon in the Parisian Salle Pleyel in 1927 [12] it was not usually incorporated into residential buildings. This system made the building completely airtight without any need to incorporate windows with an opening system.

THE TECHNOLOGICAL INNOVATIONS: CHRONOLOGY OF THE CITY OF REFUGE IN PARIS

For the City of Refuge, Le Corbusier's 1929 proposal was an active façade system similar to that previously and unsuccessfully presented to the League of Nations in Geneva [13], but more developed and advanced, designed with the advice of G. Lyon. The building could accommodate approximately 600 people sleeping in dormitories. As it was designed to be more than a simple refuge for the night it required electric and mechanical installations that operated day and night, depending on the needs of its occupants [14].

For the envelope of the dormitories, Le Corbusier designed a *mur neutralisant*, a large surface of approximately 1000 m², with a chamber through which air previously heated in winter was to circulate, maintaining indoor room temperature at around 18°C (Fig. 2). As well as helping to reach this temperature, the *respiration exacte* contributed to purifying indoor air in the dormitories, regenerating it and humidifying it when necessary. This clear forerunner of the active façade systems prompted numerous technical and financial concerns to its builders [15].

6. Propuestas innovadoras de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de edificios: Ciudad del Refugio en París

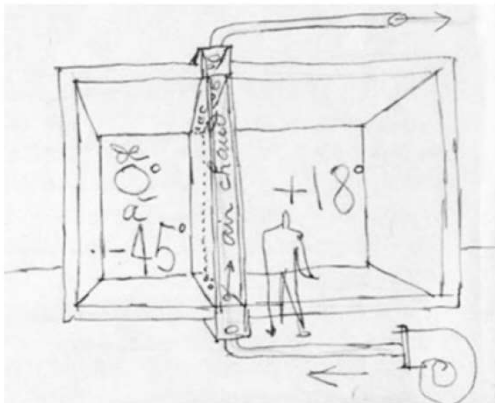


Figure 2: Description of the *mur neutralisant* by Le Corbusier.

In the end, the *mur neutralisant* was never built for mainly financial reasons, and was replaced by a *pan de verre* [16], a simple 7 mm sheet of toughened glass, manufactured using the Securit technique, developed by the company Saint Gobain at the request of the car manufacturing industry in 1929 (Fig. 3) [17]. The air chamber and the inner sheet of the glazing were eliminated, thus preventing airflow and making it impossible for the technological innovation proposed by Le Corbusier to be executed [18].

In November 1931 the contract was signed for the company "M.M.M" to be in charge of the production of this *pan de verre*, which was completed in December 1931, still pending the selection of the mechanical ventilation and thermal conditioning systems. Although Le Corbusier was unable to finally ensure the construction of a *mur neutralisant*, he hoped he would be able to convince of the suitability of its execution, and reserved space for its construction, as well as a location for the entry and exit of possible conduits [16]. In fact, in 1932 engineers from Saint Gobain carried out several trials to simulate the behaviour of the *mur neutralisant* using the calculations of G. Lyon [19]. These were mostly aimed at calculating heat transmission coefficients for different glazing thicknesses and airflow through the chamber.

The *pan de verre* manufactured had an indoor solar protection system of horizontally sliding panels that could be closed using floor guide rails, leaving an air chamber between these panels and the 2 m glazed modules (Fig. 3-4 (right)).

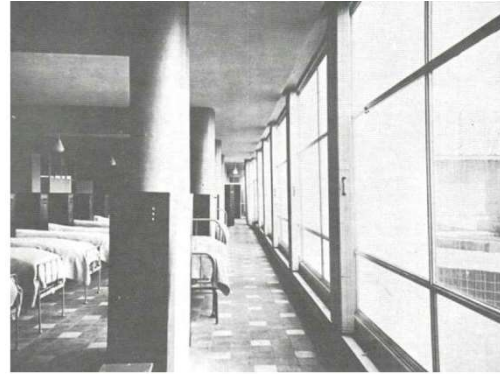


Figure 3: Interior view of the *pan de verre* with solar protection system. Brian Brace, T. (1987).

As regards *respiration exacte*, in May 1933 it was decided that the mechanical ventilation system should boost the previously filtered outdoor air to the corridors, and so, out to the roof. In winter, the operation provided 1 ACH (air change per hour) and between 2 and 3.5 ACH in summer [20]. In 1933, the Salvation Army attempted to placate the residents who felt suffocated by the heat in the summer, as they could not open the airtight windows and the ventilation system was not working. The doctor in charge of the City of Refuge admitted that the temperatures were extremely high, between 30-33°C, and that the air needed to be changed [12].

In September 1934, the Salvation Army asked for 50 windows to be opened and the interior filtered and heated air circuit to be replaced by direct ventilation grilles to the exterior. Le Corbusier was obviously in disagreement given the potential for variation in indoor temperatures [15].

In January 1935, the Technical Services of the Prefecture of the Seine stated that in the children's dormitories high concentrations of CO₂ and temperatures of 27-28°C were being reached. For empty rooms the CO₂ concentrations were normal, from 45-64 l/m³, with exterior values close to 40 l/m³. However, these concentrations increased in densely occupied rooms, reaching 272 l/m³. According to the Technical Services these concentrations were the result of the windows not opening, as this prevented the entry of clean air into the interior, and of the lack of a cooling system. Consequently, they requested that all the windows in the building be made functional [15].

Le Corbusier stated that all this was caused by the deficient operation of the ventilation system and added that the CO₂ concentrations and the increase in

temperature would be resolved by increasing the air velocity (from 1 to 3 m/s) and the flow of exterior air. He made it clear that the windows not opening was a measure to control and prevent the entry of pollution and extremely hot or cold air into the building from outside [21]. Le Corbusier proposed the money earmarked for the creation of openings be used for a cooling system to reduce the temperature in the children's rooms [22].

In January 1936, Le Corbusier hired a tribunal of accredited experts to produce a report on the ventilation in the dormitories. The conclusions of this report stated that although operation in the wintertime was correct, in the summer a cooling system was needed. As an alternative they recommended the incorporation of a row of 60 openings of 4 x 1 cm, two thirds up the glazed façade. These openings would remain closed in winter and would allow air to circulate in the summer. As a result of these suggestions, Le Corbusier proposed that sliding windows 0.90 m wide be placed on the top third of the façade [23].

All these proposals were stopped by the Second World War. In August 1944 a German bomb outside the City of Refuge completely destroyed the façade [16]. Le Corbusier offered to repair the damage and was allowed to do so on the condition that the solution for each floor should be one third solid material, the next closed glazing and the last third functional glazing. Le Corbusier incorporated the brise-soleils (Fig. 4 (left)) made up of equally size overhangs on the side of the building [24]. The closed glazing was finally made operable and construction was completed in 1952. These new features have allowed it to still be habitable.



Figure 4: Exterior view before (right) and after (left) building the brise-soleils.

ENERGY SIMULATION: EXECUTED AND PROJECTED FAÇADE SYSTEMS

An analysis and evaluation of the energy exchanges between the exterior and the interior of the main dormitory of the City of Refuge in Paris, developed at the same time as the study of its history, has allowed us to verify the validity of Le Corbusier's proposals for this building, formulated jointly with G. Lyon. This has been made possible by the advances in knowledge and simulation tools currently at our disposal.

Assessments have been carried out on the thermal behaviour of the room under study in the building as it was when it was constructed, that is to say, with the combination of *pan de verre* and *respiration exacte*. Energy simulation program DesignBuilder [25] based on the module EnergyPlus [26], was used. In addition, assessments were carried out on the efficiency of the innovations that were initially planned but never incorporated: the combination of the *mur neutralisant* (Fig. 5) and *respiration exacte*. For this, the energy evaluation was executed with Computational Fluid Dynamics (CFD), using FreeFem++ [27], which required C++ programming of the algorithms to reproduce the physical phenomena which take place. The discussion of results in both these configurations is as follows:

6. Propuestas innovadoras de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de edificios: Ciudad del Refugio en París

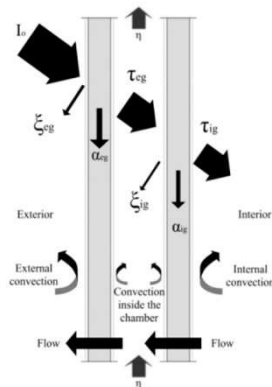


Figure 5: Physical phenomena in the mur neutralisant.

Simulation of the system executed: *pan de verre* and *respiration exacte*.

The presence of the large *pan de verre* regenerates an indoor space that is clearly dependent on exterior conditions, particularly the effect of solar radiation. This is favourable in winter as it provides thermal gains, but is clearly detrimental in summer as on a hot summer day the operative temperature increases to 33-34°C, clearly higher than the comfort temperature for summer conditions. Its combination with the constantly operating ventilation system, *respiration exacte*, is mainly designed to influence indoor air quality, but also affects room temperature, causing significant improvement in winter and summer, and increasing and reducing the operative temperature, although this still does not fall within comfort conditions.

Finally, the incorporation of an indoor solar protection system provides a decrease in summer temperatures, when it reduces part of the direct solar radiation received during the hours with highest radiation. In winter it provides an increase as it prevents major heat losses due to the thermal resistance offered by the solar protection and the air chamber between this and the glass façade at night. The opening of the solar protection system contributes to heat accumulation during the day, achieving temperatures of up to 17°C.

Simulation of the planned system: *mur neutralisant* and *respiration exacte*.

Despite the fact that they are two independent systems, the *mur neutralisant* and *respiration exacte* are interconnected and act together to make it possible to reach the desired temperature control:

G. Lyon calculated an impulse flow of 60 l/s for the active chamber and a thermal jump of 10°C between the indoor room temperature and the supply air temperature from the active chamber (30°C in winter and 15°C in



Figure 6: Energy simulation using CFD. Room with *mur neutralisant* and *respiration exacte* studied for a summer day.

summer). He also established a flow for the *respiration exacte* of 83.33 l/s and 291.66 l/s for winter and summer respectively. Considering that the supply air of the *respiration exacte* occurs in neutral conditions, that is to say, at 20°C in winter and 25°C in summer, the conditions obtained were within the recommended values for thermal comfort: around 21°C in winter and 25°C in summer (Fig. 6).

CONCLUSION

The City of Refuge, a transition piece clearly inspired by the ocean liners Le Corbusier so admired, and his obsession with incorporating new techniques into architecture, did not manage to convince with the innovations which he had hoped would provide a solution to temperature control problems. This was mostly due to the obstacles encountered in the building, which prevented the execution of one of the most brilliant technological innovations proposed by Le Corbusier: the combination of the *mur neutralisant* and the *respiration exacte*.

The reconstruction of the timeline of the project and its execution has allowed us to establish the vicissitudes and difficulties affecting Le Corbusier's innovative project. In the end it was never executed in the original planned form due to financial constraints and mistrust of the technology. Le Corbusier, with the invaluable help of G. Lyon, proposed a solution that was ahead of its time, partially controlling the façade temperature, that of the *mur neutralisant* with an active chamber through which hot or cold air flowed, depending on the time of year. His system was a forerunner of what today are known as active façade systems.

This paper has attempted to provide a transversal reading of the knowledge of Le Corbusier's work, showcasing his architecture's links with environmental conditioning through an integral concept which incorporates environmental control systems into architecture, an innovative way of understanding

architecture which fits into the framework of modern concerns for reducing energy demand.

As regards the system executed in the City of Refuge, a combination of *pan de verre* and respiration exacte, the complaints of the users to those in charge of the building, who passed these on in letters to Le Corbusier, were completely justified. The values indicated for indoor temperatures in the summer, resulting from the measurements made by the technicians following these complaints, coincide approximately with those obtained in the simulations (between 29°C and 31°C in daylight).

As regards the simulations carried out and the subsequent analysis of the system as designed initially, these validate Le Corbusier's project combining the *mur neutralisant* and *respiration exacte* for the environmental conditioning of the City of Refuge, with winter temperatures of up to 21°C and summer temperatures around 25°C, which can be considered to fall within the comfort band. Therefore, G. Lyon's calculations for both systems and the trials executed in August 1932 by Saint Gobain, show the importance of this proposal which was over 50 years ahead of modern active façade systems, whose clearest forerunner is this project by Le Corbusier.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank researchers Enrique D. Fernández Nieto and Gladys Narbona Reina from the University of Seville for knowledge contributed.

REFERENCES

1. Le Corbusier. (1983). *Armée du Salut, Cité de Refuge*. New York: Garland Publishing.
2. Brian Brace, T. (1981). Restoration is not salvation: Cité de Refuge, Paris. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Progressive architecture, Nov., v.62, n.11, 116-119.
3. Cooper, G. (1998). *Air-Conditioning America: Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960*. Johns Hopkins Univ. Press.
4. Lemoine, B. (1987). Le Corbusier dans L'Architecture d'Aujourd'hui. *Architecture d'Aujourd'hui* n° 9-45.
5. Le Corbusier. (1947). *When the cathedrals were white: a journey to the country of timid people*. New York: Cornwall Press.
6. Le Corbusier. (1946). *Towards a New Architecture*. London: Architectural Press.
7. Slessor, C. (1997). *Eco-Tech: Sustainable Architecture and High Technology*. London: Thames and Hudson Ltd.
8. Fernández-Galiano, L. (2000). *Fire and Memory: On Architecture and Energy*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
9. Sáenz de Oiza, F.J. (1987). "Entrevista a Francisco Sáez de Oiza". *Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid*. 264-265.
10. Cohen, J. L. (2004). *Le Corbusier, 1887-1965: The Lyricism of Architecture in the Machine Age*. London: Taschen.
11. Bryan, H. (1991). *Le Corbusier and the "Mur Neutralisant: An Early Experiment in Double Envelope Construction*. Proceedings of the Ninth International PLEA Conference. pp. 257-62.
12. Boesiger, W. (1999). *Le Corbusier et Pierre Jeanneret: oeuvre complete. Vol 2, 1929-1934*. Basel, Suiza: Birkhauser.
13. Colquhoun, A. (1987). The strategies of the Grands Travaux. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Assemblage, 4, 66-81.
14. Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grève à travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Glaces et Verres*, 20, 12-18.
15. Brian Brace, T. (1987). *Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. The University of Chicago Press.
16. Brian Brace, T. (1979). *La Cité de refuge di Le Corbusier, 1929/33*. Roma: Officina Edizioni.
17. SaintGobain, [Online], Available: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/SP/index.asp?nav1=AU&nav2=AUSM/> [13 September 2012].
18. Frampton, K. (2002). *Le Corbusier: Architect of the Twentieth Century*. New York: Harry N. Abrams.
19. James Inglis, D. (1988). Le Corbusier's test-bed: Le Corbusier: the City of Refuge, Paris 1929-33, by Brian Brace Taylor, with introduction by Kenneth Frampton [book review].
20. Urbano, R. (2007-2009). *About Le Mur Neutralisant & other strategies. The role of Le Corbusier environmental control proposals in the evolution of the glass facade*. Paris: Foundation Le Corbusier Research Fellowship. [Online], Available: <http://www.rosaurbano.com/research/lecorbusier/lecorbusier.html> [30 January 2012].
21. Sert, J.L., Tieleman, M. (2009). *Le Corbusier, 1887-1965. Correspondance 1928-1965*. Paris: Éditions du Linteau.
22. René Lévy, Cl. (1934). Cité de refuge de l'armée du salut, rue Cantagrel et rue deu Chevaleret, à Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Architecte, August, 43-44, 81-84.
23. Robertson, H. (1934). The Salvation Army Cité-Refuge, Paris, architects Le Corbusier & Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Architect and building news, Vol.137, 2, 165-169.
24. Requena Ruiz, I. (2011). *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)*. Tesis. Universidad de Alicante. Escuela Politécnica Superior.
25. DesignBuilder v.2.4.2.026. [Online], Available: <http://www.designbuilder.es/descargas/software-designbuilder> [17 June 2012].
26. EnergyPlus v.6.0. U.S. Department of Energy (DOE). [Online], Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_training.cfm [2 September 2011].
27. FreeFem++ v.-3.20. [Online], Available: <http://www.freefem.org/ff++/> [1 November 2011].

6.3. Discusión de resultados.

6.3.1. El muro neutralizante y la respiración exacta en la Ciudad de Refugio de París.

Para la Ciudad de Refugio de París, Le Corbusier, con el asesoramiento de G. Lyon, proyecta un sistema de fachada activa, el muro neutralizante, similar al que presentó anteriormente, y sin éxito, para el edificio Centrosoyuz en Moscú, y un sistema de ventilación mecánica, la respiración exacta, basado en el propuesto anteriormente para la Liga de Naciones en Ginebra [1], pero más desarrollado y avanzado. El edificio debía albergar a, aproximadamente, 600 personas en sus dormitorios. Como fue proyectado para ser más que un simple refugio para la noche, se requerían instalaciones eléctricas y mecánicas que funcionaran día y noche, según las necesidades de sus ocupantes [2].

Para la envolvente de los dormitorios, en su orientación sur, Le Corbusier propuso un muro neutralizante que ocuparía una gran superficie: aproximadamente 1000 m². Dicho muro estaría constituido por un doble acristalamiento con una cámara de aire intermedia a través de la cual circularía el aire previamente calentado en invierno, con el fin de mantener la temperatura interior en torno a 18 °C. Este claro precursor de los sistemas de fachada activos provocó, desde el principio, numerosas preocupaciones técnicas y financieras para sus constructores [3]. El sistema de ventilación mecánica pretendía purificar el aire interior en los dormitorios, regenerándolo y humedeciéndolo cuando fuese necesario.

El muro neutralizante nunca se construyó tal y como fue propuesto por el arquitecto suizo, por razones principalmente económicas, aunque también por las dudas técnicas que en su tiempo suscitó. A finales de 1931 se ejecutó un *pan de verre* [4], una simple lámina de vidrio templado de 7 mm, fabricada con la técnica Securit, desarrollada por la compañía Saint Gobain (Fig. 49) [5]. Por lo tanto, la cámara de aire y la hoja de vidrio interior se eliminaron, lo que impidió que funcionara tal y como fue proyectado [6]. Tras el *pan de verre*, se dispuso un sistema de protección solar interior compuesto por paneles deslizantes horizontalmente que podían cerrarse utilizando rieles como guía, dejando una cámara de aire entre estos paneles y los módulos acristalados de unos 7 cm (Fig. 50).

Le Corbusier esperaba poder convencer de la idoneidad de su propuesta inicial de solución de fachada, y mantuvo el espacio reservado para su construcción, así como una posible ubicación de conductos para la entrada y salida del aire en la cámara activa [7]. De hecho, en 1932, los ingenieros de Saint Gobain llevaron a cabo varios ensayos para simular el comportamiento del muro neutralizante utilizando los cálculos de G. Lyon [8]. Estos se dirigieron principalmente al cálculo de los coeficientes de transmisión de calor para diferentes espesores de acristalamiento y flujo de aire a través de la cámara.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



Figura 49. Vista del exterior de la fachada ejecutada con *pan de verre*. 1931.

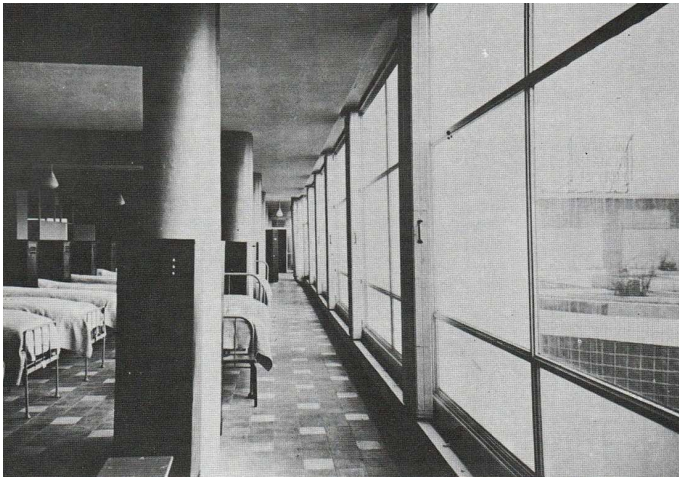


Figura 50. Vista del interior del sistema de protección solar incorporado al *pan de verre* antes de su reforma.

Para la ventilación del edificio, se decidió que el aire exterior, previamente filtrado, se circularía mediante conductos desde la cubierta hasta los pasillos y habitaciones; en estas últimas se impulsaría mediante rejillas situadas encima de las puertas de entrada. Este sistema de ventilación proporcionaba una ventilación de 1 ACH (renovación horaria) en invierno y entre 2 y 3.5 ACH en verano [9].

Pronto empezaron las quejas de los usuarios. En 1933, el Ejército de Salvación intentó aplacar a los residentes que se sentían sofocados por el calor en el verano, ya que no podían abrir las ventanas, herméticas, y el sistema de ventilación no funcionaba. El médico a cargo del edificio admitió que las temperaturas interiores eran extremadamente altas, entre 30 y 33 °C, y que era necesario renovar el aire. Como consecuencia de ello, en 1934, el Ejército de Salvación pidió que se abrieran 50 ventanas y que el circuito de ventilación fuera reemplazado por la incorporación de nuevas rejillas de ventilación que comunican directamente con el espacio exterior. En 1935, los Servicios Técnicos de la Prefectura del Sena

declararon que en los dormitorios de los niños se alcanzaban altas temperaturas y concentraciones de CO₂ cuando los dormitorios estaban densamente ocupados: 272 l/m³ cuando en el exterior había 40 l/m³. Según esos servicios, estas concentraciones se debían a que las ventanas no se abrían, lo que impedía la entrada de aire limpio al interior, y a la falta de un sistema de refrigeración. Solicitaron que todas las ventanas del edificio se hicieran practicables [10].

Le Corbusier declaró que todo esto era causado por el funcionamiento deficiente del sistema de ventilación y agregó que las concentraciones de CO₂ y el aumento de la temperatura se resolverían incrementando la velocidad del aire (de 1 a 3 m/s) y el caudal de aire exterior. Dejó claro que el hecho de que las ventanas no se abrieran era una medida para prevenir la entrada de contaminación y del aire extremadamente caliente o frío desde el exterior [11], y propuso que el dinero destinado a la practicar las aberturas se usara para un sistema de refrigeración en las habitaciones de los niños [12]. A principios de 1936, un tribunal de expertos concluyó en un informe que, si bien la operación en invierno era correcta, en verano se necesitaba un sistema de refrigeración, recomendando como alternativa la incorporación de una fila de 60 aberturas de 4 x 1 cm en el tercio superior de la fachada de cada planta. Estas aberturas permanecerían cerradas en invierno y permitirían que el aire circulara en verano. Como resultado de estas sugerencias, Le Corbusier propuso colocar ventanas correderas de 0.90 m de ancho en el tercio superior de la fachada [13].

En agosto de 1944, una bomba alemana que cae en las afueras de la Ciudad de Refugio destruye completamente la fachada [1]. Le Corbusier se ofreció para su restauración y se le permitió hacerlo a condición de que la solución para cada planta debería disponer de tres franjas: una primera de material sólido, una segunda de acristalamiento fijo y una tercera de ventanas practicables para permitir la ventilación natural. Le Corbusier aceptó la propuesta e incorporó *brise-soleils* como sistema de protección solar por el exterior (Fig. 41) [14]. El acristalamiento fijo finalmente se hizo practicable y la construcción se completó en 1952. No ha habido cambio significativo de la solución de fachada desde entonces.

6.3.2. Simulación del comportamiento térmico.

En esta primera publicación se efectúa ya un primer análisis comparativo sobre la incidencia que el cambio de solución de fachada supuso en el comportamiento térmico del caso de estudio. Se generaron pues dos modelos energéticos, uno con la solución proyectada: muro neutralizante compuesto por dos hojas de vidrio de 7 mm de espesor dejando una cámara de aire intermedia de 100 mm por la que circulaba un flujo de aire frío o caliente (cámara activa), según la estación del año (Fig. 47), y otro con la solución ejecutada: hoja de vidrio sencillo de 7 mm. En ambos se combinó su efecto con la respiración exacta: un sistema de ventilación mecánica con un caudal de impulsión en el interior de la habitación que oscilaba entre 83.33 l/s, en invierno, y 291.66 l/s, en verano. Para la simulación de esos dos modelos energéticos se utilizó tanto el

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

módulo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del programa DesignBuilder, como el programa FreeFem++.

6.3.2.1. Simulación del sistema ejecutado: *pan de verre* y respiración exacta.

Los resultados de la simulación de este modelo indican que la presencia del gran *pan de verre* genera un espacio interior con una marcada dependencia de las condiciones exteriores, principalmente debida al efecto de la radiación solar, favorable en el periodo de invierno al proporcionar ganancias térmicas, pero que puede llegar a ser perjudicial en verano, puesto que en un día desfavorable de verano la temperatura operativa se puede elevar a 33-34 °C, claramente por encima de la temperatura de confort.

La combinación con el sistema de ventilación mecánica, principalmente concebido para incidir en la calidad de aire interior, pero que también afecta a las temperaturas de las habitaciones y a su distribución, produce una mejora significativa de las condiciones ambientales interiores, tanto en invierno como en verano, incrementando y disminuyendo, respectivamente, la temperatura operativa, aunque se sigue estando alejado de las condiciones de confort en días desfavorables de ambas estaciones.

Por tanto, las quejas de los usuarios a los responsables del edificio y las de éstos a Le Corbusier, manifestadas en las cartas, estaban plenamente justificadas. De hecho, los valores que en ellas se indican sobre las temperaturas interiores en verano, fruto de las mediciones que hicieron los técnicos antes esas quejas, coinciden aproximadamente con los obtenidos en las simulaciones (29-31 °C).

La incorporación del sistema de protección solar interior móvil ejecutado mejora el comportamiento térmico en la habitación, tanto en verano como en invierno, pues logra un descenso de las temperaturas interiores en verano, al reducir el efecto de la radiación solar directa recibida durante las horas de mayor radiación, y produce un incremento de esas temperaturas en invierno, puesto que su despliegue en horas nocturnas reduce las pérdidas de calor gracias a la resistencia térmica que ofrece la propia protección solar y la cámara de aire generada entre ella y la superficie de vidrio de la fachada.

6.3.2.2. Simulaciones del sistema proyectado: muro neutralizante y respiración exacta.

La simulación del sistema proyectado se ha realizado a partir de los cálculos llevados a cabo por G. Lyon, así como de las principales conclusiones del ingeniero J. Le Braz en los ensayos realizados en agosto de 1932 por Saint Gobain [15]. A pesar de que ellos sólo lo realizaron para las condiciones de invierno, en el estudio hemos incluido también el periodo de verano. En consecuencia, se ha estimado un caudal de aire, previamente calentado o enfriado, de 60 l/s por cada metro lineal de muro a impulsar en el interior de la cámara de aire situada entre las dos hojas de vidrio, y un salto térmico (positivo o negativo, según la estación) de 10 °C entre la temperatura del ambiente interior que se pretendía alcanzar en la habitación: 20

6. Propuestas innovadoras de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de edificios:
Ciudad del Refugio en París

°C en invierno y 25 °C en verano, y la temperatura de impulsión del aire en la citada cámara: 30 °C en invierno y 15 °C en verano.

Los resultados de dichas simulaciones muestran que si las condiciones de impulsión del aire de ventilación en la habitación objeto de estudio se producen de modo neutro (aire primario neutro), es decir, a 20 °C en invierno y 25 °C en verano, los valores medios de las temperaturas interiores están dentro de los recomendados para el confort térmico: alrededor de 21 °C en invierno (Fig. 51) y 25 °C en verano (Fig. 52). Por tanto, validan las propuestas realizadas por Le Corbusier.

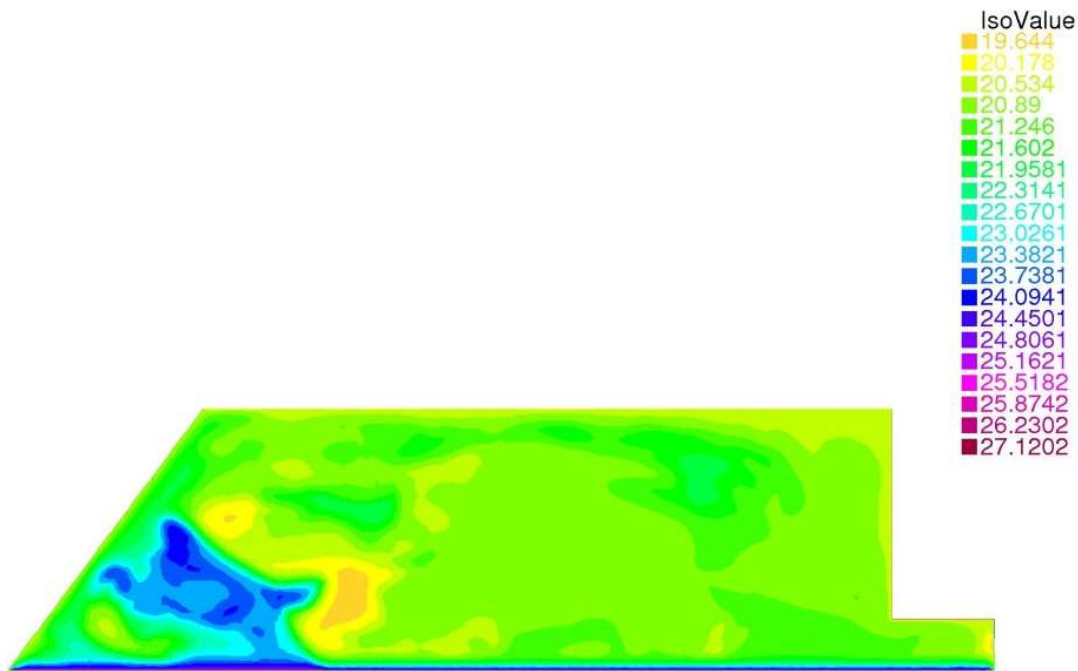
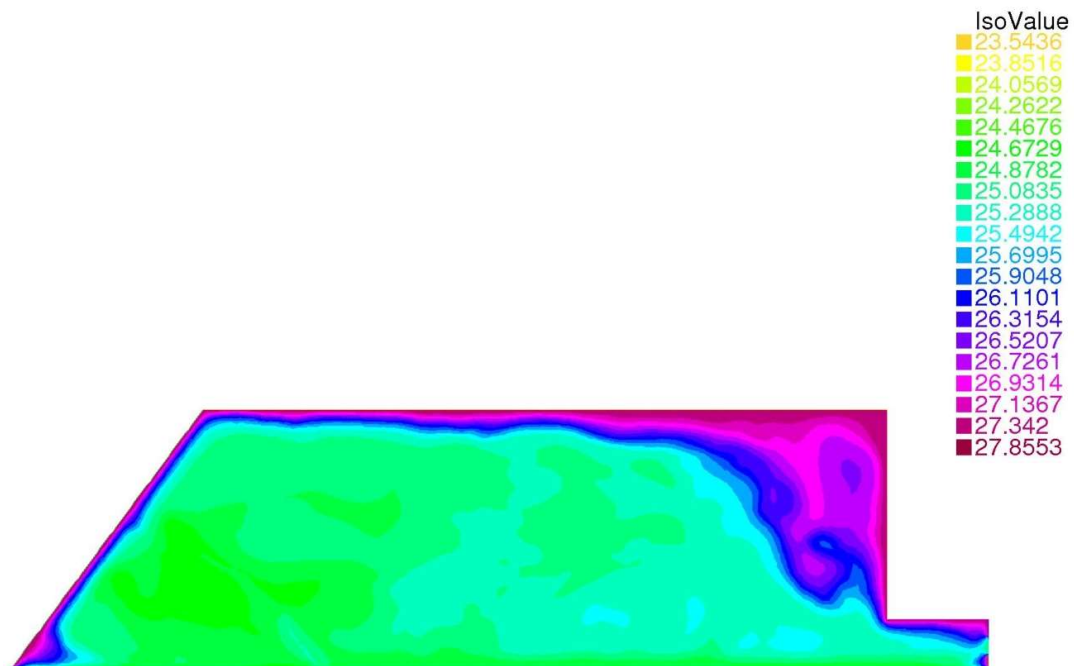


Figura 51. Simulación energética usando CFD. Habitación de estudio con muro neutralizante y respiración exacta para un día desfavorable de invierno.



Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Figura 52. Simulación energética usando CFD. Habitación de estudio con muro neutralizante y respiración exacta para un día desfavorable de verano.

-
- 1 Colquhoun, A. (1987). The strategies of the Grands Travaux. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Assemblage, 4, 66-81.
 - 2 Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grève à travers le verre: des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Glaces et Verres*, 20, 12-18.
 - 3 Taylor, B.B. (1987). *Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. The University of Chicago Press.
 - 4 Taylor, B.B. (1979). *La Cité de refuge di Le Corbusier, 1929/33*. Roma: Officina Edizioni.
 - 5 Saint Gobain, Disponible en:
<http://www.saint-gobain-sekurit.com/SP/index.asp?nav1=AU&nav2=AUSM/> (13 September 2014).
 - 6 Frampton, K. (2002). *Le Corbusier: Architect of the Twentieth Century*. New York: Harry N. Abrams.
 - 7 Boesiger, W. (1999). *Le Corbusier et Pierre Jeanneret: oeuvre complete*. Vol 2, 1929-1934. Basel, Suiza: Birkhauser.
 - 8 James Inglis, D. (1988). Le Corbusier's test-bed: Le Corbusier: the City of Refuge, Paris 1929-33, by Brian Brace Taylor, with introduction by Kenneth Frampton [book review].
 - 9 Urbano, R. (2007-2009). *About Le Mur Neutralisant & other strategies. The role of Le Corbusier environmental control proposals in the evolution of the glass facade*. Paris: Foundation Le Corbusier Research Fellowship. [Online], Available:
<http://www.rosaurbano.com/research/lecorbusier/lecorbusier.html> (30 January 2015).
 - 10 James Inglis, D. (1988). Le Corbusier's test-bed: Le Corbusier: the City of Refuge, Paris 1929-33, by Brian Brace Taylor, with introduction by Kenneth Frampton [book review]. *Avery Index to Architectural Periodicals. Architects' journal*, Vol.188, 37, 99.
 - 11 Sert, J.L, Tieleman, M. (2009). *Le Corbusier, 1887-1965. Correspondance 1928-1965*. Paris: Éditions du Linteau.
 - 12 René Lévy. Cl. (1934). Cité de refuge de l'armée du salut, rue Cantagrel et rue deu Chevaleret, à Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals. Architecte*, August, 43-44, 81-84.
 - 13 Robertson, H. (1934). The Salvation Army Cité-Refuge, Paris, architects Le Corbusier & Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals. Architect and building news*, Vol.137, 2, 165-169.
 - 14 Requena Ruiz, I. (2011). *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)*. Tesis. Universidad de Alicante. Escuela Politécnica Superior.
 - 15 Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grève à travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Revista Glaces et Verres*, 20, 12-18.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

Nombre y adscripción de autor y coautores.

The mur neutralisant as an active thermal system: Saint Gobain tests (1931) versus CFD simulation (2015).
Cristina Ramírez Balas, Juan José Sendra Salas, Rafael Suárez Medina, Enrique D. Fernández Nieto,
Gladys Narbona-Reina

Referencia completa de la revista o editorial de publicación.

LC 2015 International Congress: Le Corbusier. 50 Years Late. ETSA Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, España. 2015; publicado en los *Proceedings* del congreso internacional, doi: 10.4995/LC2015.2015.899.

7.1. Resumen

Son dos los objetivos principales de esta publicación: ajustar el modelo numérico generado para valorar el funcionamiento del muro neutralizante como sistema de fachada activo para el acondicionamiento térmico de edificios, a partir de los resultados de los ensayos en modelos físicos realizados a principio de la década de los 30 por los ingenieros de Saint Gobain; y aplicar dicho modelo numérico del muro neutralizante (sin el concurso de la respiración exacta) a la habitación objeto de estudio en diferentes condiciones ambientales (invierno y verano) y operacionales (calefacción y refrigeración).

Los ensayos realizados por los ingenieros de Saint Gobain pretendían determinar la idoneidad del muro neutralizante como sistema de calefacción activo con temperaturas exteriores extremas y sin la presencia beneficiosa de la radiación solar. Los ensayos y sus resultados quedaron registrados en documentos datados en 1931-1932, modificando el espesor de la cámara intermedia, así como el caudal y temperatura de impulsión de aire caliente en dicha cámara.

El método utilizado ha consistido en comparar los resultados de estos ensayos realizados en modelos físicos con los obtenidos en simulaciones de modelos virtuales previamente generados, utilizando los principios de la dinámica de fluidos computacional, que los reproducen en las mismas condiciones ambientales y operacionales de los ensayos, con el fin de ajustar estos modelos virtuales. Para las simulaciones se ha utilizado el programa CFD de código abierto FreeFem++.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Una vez ajustados los modelos virtuales, se ha validado el modelo numérico que los generó y se han obtenido los resultados del comportamiento térmico en uno de estos modelos construido con un muro neutralizante compuesto por dos hojas de vidrio de 7 mm, una cámara de aire intermedia de 110 mm, un caudal de impulsión de aire en dicha cámara de 100 l/s por cada metro lineal de muro y una temperatura de impulsión variable en función de la temperatura exterior, parámetros de diseño propuestos por los ingenieros de Saint Gobain tras los ensayos. En este primer modelo numérico recogido en esta publicación no se ha contemplado la respiración exacta. Las simulaciones se han completado estudiando el efecto de la radiación solar en invierno a fin de obtener un mayor conocimiento sobre el funcionamiento del sistema de calefacción, principalmente en horas diurnas, y se ha verificado el funcionamiento del modelo como sistema de refrigeración.

Esos resultados muestran la idoneidad del muro neutralizante como sistema de calefacción/refrigeración. Aplicado el modelo numérico al caso de estudio, los resultados de las simulaciones muestran que, en días con temperaturas bajas en invierno, impulsando el aire de la cámara a 21-23 °C, se obtienen temperaturas interiores sensiblemente uniformes y próximas a las de confort, aunque disminuyen como era de esperar conforme nos separamos del muro; en días desfavorables de verano, impulsando el aire de la cámara a 15-18 °C produce asimismo temperaturas interiores medias próximas a las de confort, aunque el aumento de la radiación solar repercute en una menor uniformidad térmica. La no necesidad de calentar o enfriar excesivamente el aire de la cámara intermedia nos da idea de la eficiencia energética del sistema.

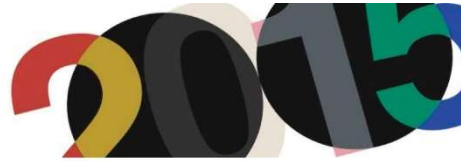
7.2. Publicación



Le Corbusier, 50 years later
International Congress
<http://cargocollective.com/LC2015>



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



The mur neutralisant as an active thermal system: Saint Gobain tests (1931) versus CFD simulation (2015)

C. Ramírez-Balas*, J. J. Sendra *, R. Suárez*, E. D. Fernández-Nieto**, G. Narbona-Reina**:

* Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

** Departamento de Matemática Aplicada I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

Abstract: At the same time as the initial development of air conditioning systems for indoor climate control in buildings were occurring in USA, Le Corbusier and Lyon made truly innovative proposals for different projects he was working on in Europe. These served to generate homogenous thermal environments and focused on the combined effect of his mur neutralisant and respiration exacte. The clearest example of their shortcomings is the City of Refuge in Paris (1930-33). Given the technological and economic mistrust towards these proposals, as it was impossible to execute these according to the original plan these were not pursued. CFD simulations carried out by our research team confirm that the mur neutralisant and respiration exacte for the City of Refuge in Paris would have functioned together if they had been executed following the original plans. The main aim of this paper is to confirm the validity of the mur neutralisant as an active thermal system for buildings. Firstly, the results of the tests carried out by the engineers of Saint Gobain are compared to the results of the CFD simulations. Based on the comparison of the results from the physical models tested in Saint Gobain laboratories and CFD energy model simulations, a possible calibration is proposed for CFD which might prompt the establishment of other operation hypotheses.

Keywords: Le Corbusier; mur neutralisant; The City of Refuge; Active Façade System; Computational Fluid Dynamics (CFD); Numerical Simulation

1. Introduction

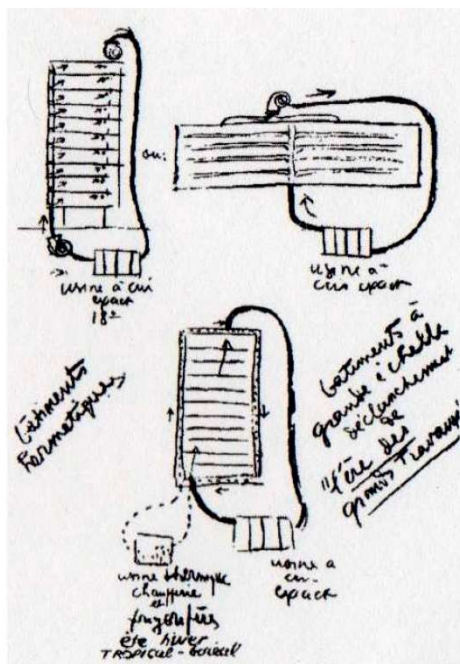
In the 20th century, air conditioning systems gained success first in the United States and then in Europe, and their use became increasingly widespread throughout the century. In contrast, the proposals from Le Corbusier and Lyon, based on the combination of the *mur neutralisant* and *respiration exacte* (figure 1) as an active thermal system, only provoked technical and financial mistrust so that they were not followed up and could not be executed as planned. However, in the late 20th century these reappeared as predecessors of active façade systems. The best-known example of their failure is the City of Refuge in Paris (1930-33), designed as Salvation Army accommodation for between 500 and 600 homeless people.

However, simulations carried out by our research team using Computational Fluid Dynamics (CFD) programs confirm the combined effect of the *mur neutralisant* and *respiration exacte* on the temperature control of the main dormitory in the City of Refuge of Paris if the system had been executed following the original designs of Le Corbusier and Lyon¹. The main aim of this study is to establish the suitability of the *mur neutralisant* as an

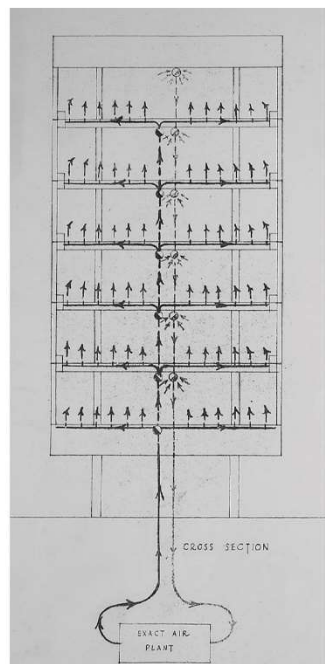
¹Ramírez Balas, C.; Fernández Nieto, E.D.; Narbona Reina, G.; Sendra, J. J.; Suárez, R. "Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to 'The City of Refuge' by Le Corbusier". *Energy and buildings*. 2015. 86. pp. 708-722.

active conditioning system for buildings. In the 1930s Saint Gobain engineers Lebel and Le Barbier carried out laboratory tests on physical models to ascertain the suitability of the *mur neutralisant* as an active heating system in extreme outdoor temperatures and without solar radiation^{2 3 4 5}. Our research group has compared these with the results obtained in 2015 using energy models and CFD simulations of the same operation and outdoor environmental conditions.

Following the comparison and adjustment of both models, other hypotheses have been established regarding the operation of the energy models and subsequent CFD simulation of the design of a south-facing *mur neutralisant* for the main dormitory in the City of Refuge. The operation of the *mur neutralisant* has been assessed as an active heating system for cold winter days with and without sunlight, including the influence of solar radiation, which was neglected in the Saint Gobain tests, and as an active cooling system on hot summer days, an operation mode which Saint Gobain also failed to test.



1a. Diagram by Le Corbusier of the operation of the *mur neutralisant*⁶.



1b. Drawing by Le Corbusier of the *mur neutralisant* and *respiration exacte*⁷.

²Le Braz, J. "La transmission de la chaleur grâverâ travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations." *Glaces et Verres*, 1933, N° 20, pp. 13.

³Brian Brace, T. "Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33", Chicago: University of Chicago Press. 1987.

⁴Cuadernos de Postgrado. La respuesta de la American Blower Corporation. 24 January 1930.

⁵Bryan, Harvey. "Le Corbusier and the 'Mur Neutralisant': An Early Experiment in Double Envelope Construction." *Proceedings of the Ninth International PLEA Conference*. 1991. pp. 257-62.

⁶Le Corbusier. El edificio hermético. "Croquis de Précisions".

1. Proposal by Le Corbusier for the *mur neutralisant* and *respiration exacte*.

2. Saint Gobain tests

On Le Corbusier's instructions, Saint Gobain engineers carried out numerous tests over a two-year period, recording them in two documents on 25 June 1931⁸ and 11 March 1932⁹.

The test room (figure 2) consisted of two rooms with a 0.5 m intermediate space and 7 mm double glazing in a wooden frame with an air cavity varying between 3 and 20 cm in width. The room known as the hot room representing the interior space, measured 2.04 x 1.64 m and was 2.72 m high. It needed to maintain an indoor temperature of 18 °C to ensure minimum thermal comfort conditions in winter. Another "cold" room, measuring 0.8 x 1.4 m and 2.4 m high, represented the outdoor space. The temperature in this cold room could be maintained at different low winter levels.

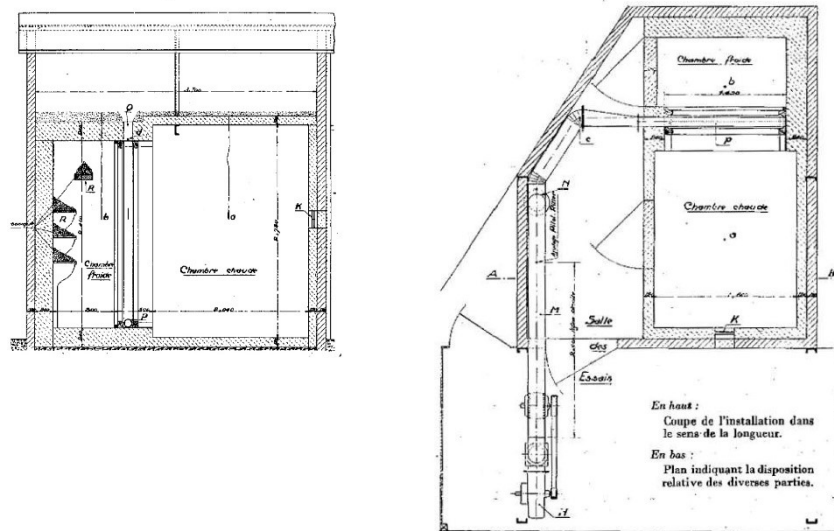
Walls, ceilings and floors were built using 12 cm thick expanded cork insulation panels in the hot room, while those used in the cold room were 24 cm thick. On two of these walls the panels were in contact with a brick enclosure. All openings were sealed and a 22 x 22 cm window (K) was used to review the installation without opening the door. Figure 2 shows the following elements: a 2.5 m long conduct, used to measure the fan-driven airflow, which varied between 0 and 150 l/s; an air heater consisting of a series of electric resistances which could bring the temperature up to 50 °C; a device consisted of a shell with holes on top, placed at the bottom of the air cavity between both glass panes and distributing air inside the cavity. The hot air passing between both glass sheets was expelled through a hole at the top of the air cavity. Finally, four temperature sensors were placed: (a) at the centre of the hot room; (b) at the centre of the cold room, 1.22 m from the glass; (c) in the hot air conduct, prior to air entry to the cavity; and (d) at hot air outlet, at the top of the air cavity.

⁷Foundation Le Corbusier. FLC 15720. ©FLC-ADAGP.

⁸Lebel, H.; Le Barbier, M. Société Anonyme des Manufactures des Glaces et Produits Chimiques de Saint-Gobain, Chauny et Cirey. Note sur les essais de transmission de la chaleur à travers les glaces, effectués à l'Annexe du Comptoir de Vente, 23 rue Boucry, Paris du 3 Avril au 8 Mai 1931. Letter of 25 June 1931.

⁹Lebel H.; Le Barbier, M. Société Anonyme des Manufactures des Glaces et Produits Chimiques de Saint-Gobain, Chauny et Cirey. Note sur la seconde série d'essais effectués pour la mesure de la transmission de la chaleur à travers les glaces à l'Annexe du Comptoir de Vente, 23 rue Boucry, Paris du 23 Novembre au 21 Décembre 1931. Letter of 11 March 1932.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



2. Horizontal and vertical section of the Saint Gobain test room¹⁰.

Various tests proposing different hypotheses were carried out on a 7 mm double glazed *mur neutralisant*. The width of the air cavity, airflow and duration of the test were modified. The main aim was to obtain a low transmission coefficient (Q) for the *mur neutralisant* in winter with a view to maintaining an indoor room temperature of 18°C in very low outdoor temperatures with no solar radiation.

Between 3 April and 8 May 1931 an initial series of tests was carried out for three air cavity widths: 20 mm, 70 mm and 120 mm, with no hot airflow through the cavity (table 1). The Q values obtained were 2.80, 3.36 and 3.92 kcal/h m² °C, respectively. Accordingly, the decision was made to continue the tests with a hot airflow of 100 l/s into the air cavity (active chamber), at different temperatures and cavity widths between 11 and 12 cm. An initial run of three tests on the 12 cm active chamber was carried out with different airflow temperatures suited to the cold room temperature (case 1, table 2), followed by a second three-test run with the same airflow, varying the cavity widths to 11 cm (case 2, table 3), and with cold room and hot airflow temperatures also differing from earlier ones. In both cases the hypotheses were numbered following the chronological order of tests.

	13 April	15 April	14 April
Test duration	2h 30'	2h 45'	2h 30'
Active chamber width	12 cm	7 cm	2 cm
Mean T hot room: T _c	+18 °C	+18 °C	+18 °C
Mean T cold room: T _f	-7.5 °C	-22.5 °C	-15.5 °C
Mean ambient T: T _a	+12.8 °C	+13 °C	+12.2 °C
Value of Q (kcal/hm ² °C)	2.80	3.36	3.92

Table 1. Tests on *mur neutralisant* with different chamber widths and no heating.

¹⁰Le Braz, J. "La transmission de la chaleur gràverà travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations". *Glaces et Verres*. 1933, N° 20, pp. 13.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

Case 1: 12 cm	Hypothesis 1	Hypothesis 2	Hypothesis 3
	27 April	28 April	29 April
Test duration	1h 30'	1h 15'	2h 45'
Active chamber width	12 cm	12 cm	12 cm
Mean T hot room: Tc	+19 °C	+16.2 °C	+16 °C
Mean T cold room: Tf	-6 °C	- 8.8 °C	- 17.5 °C
Mean ambient T: Ta	+14 °C	+15 °C	+13.5 °C
Inlet T <i>mur neutralisant</i>	+20.25 °C	+20.2 °C	+22.7 °C
Outlet T <i>mur neutralisant</i>	+17.5 °C	+16.5 °C	+17.5 °C
Airflow	100 l/s	100 l/s	100 l/s
Value of Q (kcal/hm ² °C)	5.95	6.78	6.70

Table 2. Test on 7+120+7 mm *mur neutralisant* with hot airflow inside the active chamber and with the same flow.

Case 2: 11 cm	Hypothesis 1	Hypothesis 2	Hypothesis 3
	8 May	8 May	8 May
Test duration	50'	4 h 15'	55'
Active chamber width	11 cm	11 cm	11 cm
Mean T hot room: Tc	+18 °C	+18 °C	+18 °C
Mean T cold room: Tf	-28 °C	-20 °C	-13 °C
Mean ambient T: Ta	17°	17°	17°
Inlet T <i>mur neutralisant</i>	+38 °C	+31.5 °C	+27.5 °C
Outlet T <i>mur neutralisant</i>	+28.5 °C	+24 °C	+22 °C
Airflow	100 l/s	100 l/s	100 l/s
Value of Q (kcal/hm ² °C)	6.60	7.00	6.60

Table 3. Test on 7+110+7 mm *mur neutralisant* with hot airflow inside the active chamber and with the same flow.

Between 23 November and 21 December another three tests were carried out with different flows and hot airflow temperatures in the 12 cm active chamber, depending on the temperature of the cold room (case 1, table 4).

Case 1: 12 cm	Hypothesis 4	Hypothesis 5	Hypothesis 6
	26 November	18 December	18 December
Test duration	1h	1h 30'	1h 45'
Active chamber width	12 cm	12 cm	12 cm
Mean T hot room: Tc	+17.2 °C	+18.1 °C	+18 °C
Mean T cold room: Tf	-11.5 °C	-11.8 °C	-10.5 °C
Mean ambient T: Ta	+13 °C	+7.5 °C	+8 °C
Inlet T <i>mur neutralisant</i>	+35.7 °C	+35.5 °C	+43.7 °C
Outlet T <i>mur neutralisant</i>	+29.2 °C	+29.7 °C	+32.5 °C
Airflow	150 l/s	120 l/s	85 l/s
Value of Q (kcal/hm ² °C)	6.98	6.34	5.35

Table 4. Test on 7+120+7 mm *mur neutralisant* with hot airflow inside the active chamber and with different flows.

On 12 December 1931 a test was carried out using an electric radiator inside the 13 cm cavity in order to determine the influence of hot air convection within this active chamber (case 3, table 5).

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Case 3: 13 cm	12 December
Test duration	1h 30'
Active chamber width	13 cm
Mean T hot room: T _c	+18.5 °C
Mean T cold room: T _f	-10.2 °C
Mean ambient T: T _a	+2.7 °C
Mean T cavity	+42.1 °C
Value of Q (kcal/hm ² °C)	5.49

Table 5. Test on 7+130+7 mm *mur neutralisant* with intermediate heating from electric radiator.

Finally, in late 1931 a further two tests were executed with a *mur neutralisant* configuration consisting of three 7 mm panes, with a 65 mm separation between the outer glazing and the intermediate glazing, and 120 mm between the intermediate and the inner glazing, with no hot airflow in the two air chambers (table 6).

	1 December	16 December
Test duration	1h 26'	2h 3'
Width of cavity between inner glazing and intermediate glazing	12 cm	12 cm
Width of cavity between intermediate glazing and outer glazing	6.5 cm	6.5 cm
Mean T hot room: T _c	+17.6 °C	+18 °C
Mean T cold room: T _f	-10.9 °C	-11.5 °C
Mean ambient T: T _a	+6.2 °C	+7.4 °C
Value of Q (kcal/hm ² °C)	1.65	1.71

Table 6. Tests on 7+65+7+120 +7 mm *mur neutralisant* without heating.

3. Numerical model proposed for the simulation of the *mur neutralisant*

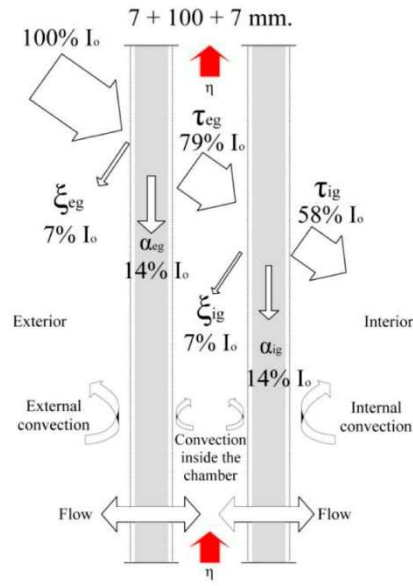
Current CFD energy simulation systems make it possible to evaluate the energy behaviour of the *mur neutralisant* solution proposed by Le Corbusier. In fact, our research group has developed a CFD model not only reproducing the behaviour of Le Corbusier's *mur neutralisant*, but also its behaviour when combined with *respiration exacte*¹¹. The numerical calculation model drawn up using mathematical codes and ways of resolution was implemented and subsequently simulated using FreeFem++ (hereafter FF++)¹².

Figure 3 clearly shows the energy flows within the *mur neutralisant*, which were taken into account in the design of the model. Of the total incident solar radiation (I_o), 7% was reflected to the exterior (ξ_{cg}) and 14% absorbed by the outer glazing (α_{cg}). The remaining 79% of energy incides on the inner glazing (τ_{cg}), with 7% transmitted to the air cavity through reflection (ξ_{ig}), 14 % absorbed by the inner glazing (α_{ig}) and finally, 58% of incident solar energy which is transmitted to the room (τ_{ig}).

¹¹Ramírez Balas, C.; Fernández Nieto, E.D.; Narbona Reina, G.; Sendra, J.J.; Suárez, R. "Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a *mur neutralisant*. Application to 'The City of Refuge' by Le Corbusier". *Energy and buildings*. 2015. Vol. 86. pp. 708-722.

¹²FreeFem++ v.-3.37-1. Available from: <http://www.FreeFem.org/ff++/> (22.05.15).

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain



3. Scope and detail of physical phenomena in the *mur neutralisant*.

The numerical model proposed resolves the following system of partial differential equations:

$$\begin{cases} (\rho c V)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} = -\eta c \frac{\partial T_f}{\partial z} + U_c A (T_{eg} - T_f) + U_c A (T_{ig} - T_f) \\ (\rho c V)_{eg} \frac{\partial T_{eg}}{\partial t} = U_{ext} A (T_{ext} - T_{eg}) + U_c A (T_f - T_{eg}) + \sigma \epsilon_{eg} (T_{ext}^4 - T_{eg}^4) + \alpha_{eg} I_o + Q_{eg} \\ (\rho c V)_{ig} \frac{\partial T_{ig}}{\partial t} = U_{int} A (T_{int} - T_{ig}) + U_c A (T_f - T_{ig}) + \sigma \epsilon_{ig} (T_{int}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig} \end{cases}$$

with $z \in [0, L]$, L is the length of the *mur neutralisant* and $t \in [t_0, t_M]$ time.

The model designed can calculate in both winter and summer conditions as it makes it possible to introduce the absorption, transmission and reflection of solar radiation and the convection flows in the glazing due to incidence of solar radiation and exterior temperature.

The model was validated with the models proposed by Ismail and Henríquez¹³¹⁴¹⁵. This research focused exclusively on the study of the effects of the *mur neutralisant*. The complete development of the numerical model can be consulted in¹⁶.

¹³Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. "Modeling and simulation of a simple glass window", *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2003. 80. pp. 355–374.

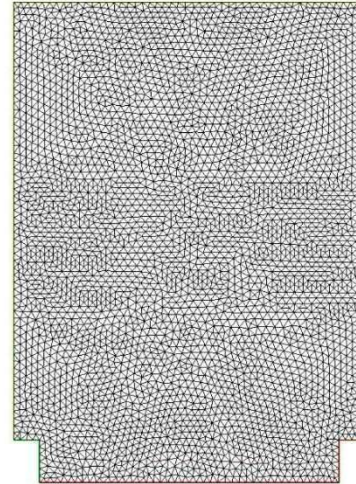
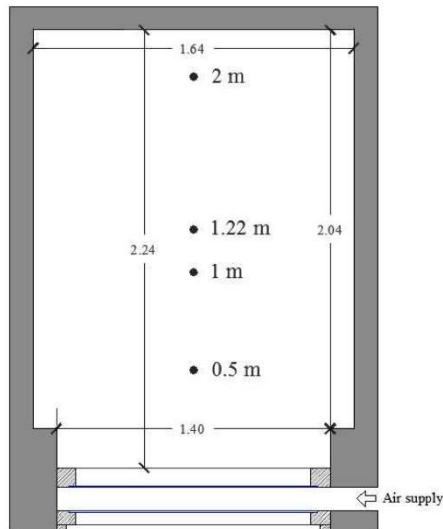
¹⁴Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. "Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window", *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. 48. pp. 461–475.

¹⁵Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. "Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions". *Applied Thermal Engineering*. 2006. 26. pp. 295–302.

4. Numerical model vs. Saint Gobain tests

The initial proposal was the comparison of the results of the 1930s Saint Gobain tests (hereafter SG) with the FF++ simulation results of the Computational Fluid Dynamics numerical models design (hereafter CFD), with only the *mur neutralisant* in operation.

The CFD model reproduces the Saint Gobain test room, respecting the measurements and characteristics of the room and the *mur neutralisant* under study (Fig. 4). The mesh density in the CFD model was adjusted to ensure reliable results and a minimum margin of error (Fig. 5).



4. Dimensions and points of measurement for the SG room.

5. Density of the SG room mesh for CFD model.

Test 2, with a 7+110+7 mm *mur neutralisant* in the Saint Gobain hypothesis, was taken as reference for the comparison of the results of both models for two main reasons. It was the test with the longest duration, 4 h 15 m, to maintain the room at 18 °C and it established an air flow of 100 l/s in the chamber. Saint Gobain established this value after analysing the effect of different flows, such as 120 l/s and 150 l/s. It was shown that with the reduction of airflow to 100 l/s there was a considerable reduction in the heat transmission coefficient due to less turbulence in the air chamber and less active exchanges between the hot air and the cold outer glazing.

Table 7 shows the results of the CFD model simulation at hourly intervals from the first to the fourth hour, recording the evolution of the different temperatures both in the room and the *mur neutralisant* itself. As with the SG model, the simulation was carried out in the absence of solar radiation. In addition, figure 6 shows the output

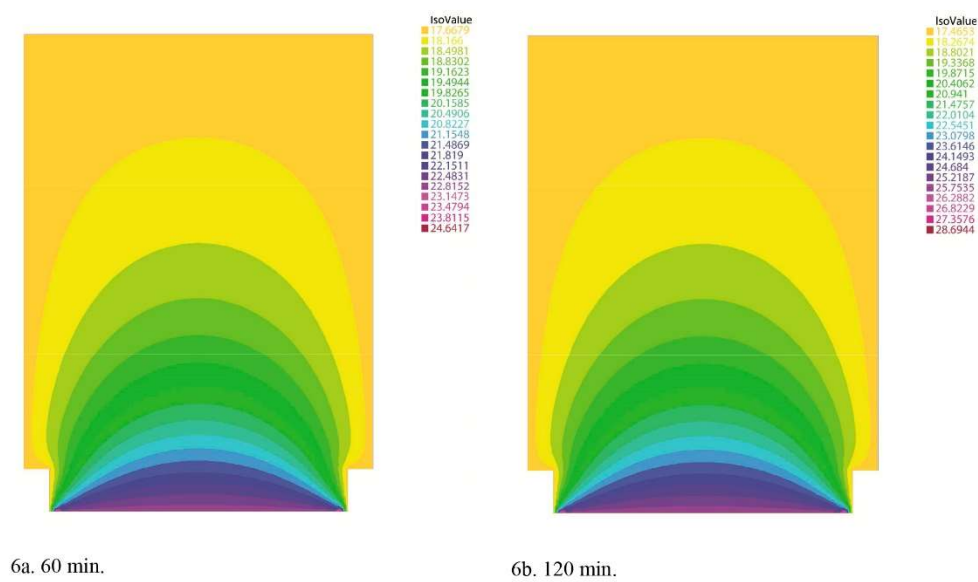
¹⁶Ramírez Balas, C.; Fernández Nieto, E.D.; Narbona Reina, G.; Sendra, J. J.; Suárez, R. "Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to 'The City of Refuge' by Le Corbusier". *Energy and buildings*. 2015. 86. pp. 708-722.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

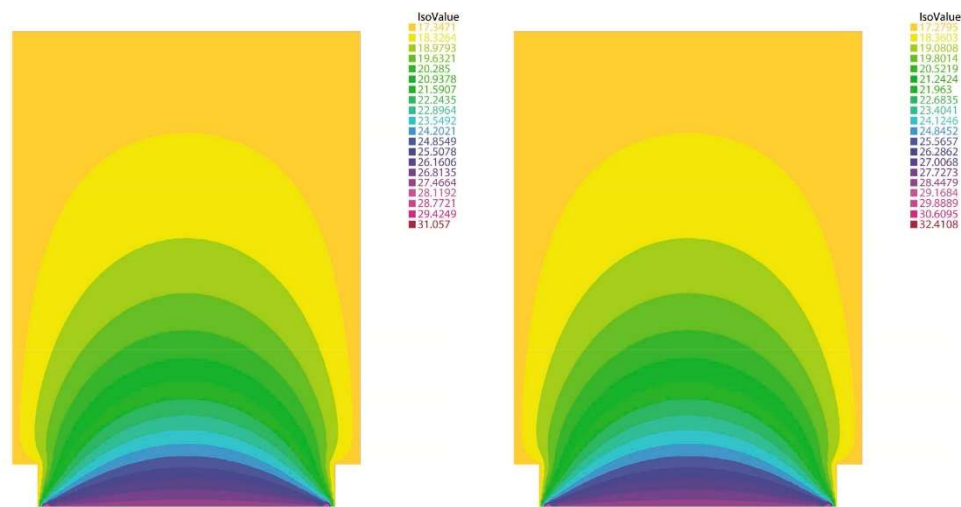
of the results of the CFD model for the same hourly intervals. Based on these results, a graph was produced to show the distribution of the indoor room temperature in relation to the room depth (Fig. 7).

		Test duration FF++ (CFD)			
Room under study		60 min	120 min	180 min	240 min
0.5 m Room temperature	T 0.5 m	20.15	21.50	22.29	22.74
1 m Room temperature	T 1 m	18.82	19.35	19.65	19.82
1.22 m Room temperature	T 1.22 m	18.53	18.87	19.07	19.18
2 m Room temperature	T 2 m	18.07	18.12	18.15	18.16
<i>Mur neutralisant</i>		60 min	120 min	180 min	240 min
Exterior glazing temperature	Teg	-3.38	3.76	6.41	7.41
Interior glazing temperature	Tig	21.89	25.24	27.10	28.47

Table 7. Temperatures of the room and *mur neutralisant* following CFD simulations with air heating.



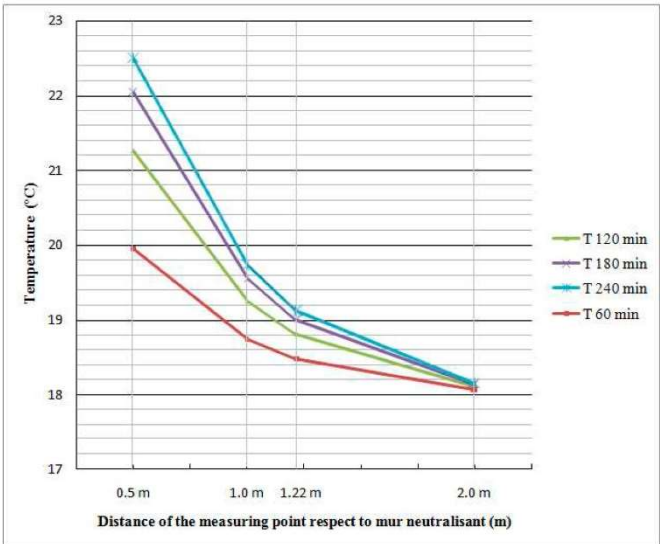
Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



6c. 180 min.

6d. 240 min.

6. Results of the CFD simulation at hourly intervals (horizontal model section) with air heating.



7. Evolution of indoor temperature at different points of the room over 4 hours with air heating.

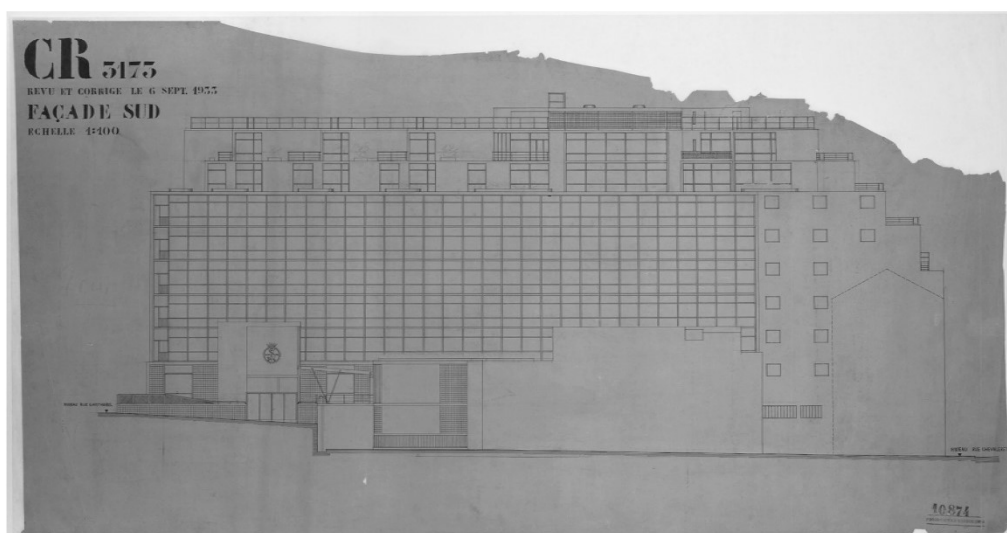
Figure 7 shows that with the same flow temperature in the active chamber as the SG model, 31.5 °C, and the mass flow from the same airflow in the chamber, 100 l/s, the temperature 1.22 m deep where Saint Gobain placed temperature probes is around 19 °C, a degree higher than that of SG. Convergence at 18 °C takes place 2 m from the *mur neutralisant*. Therefore, with this temperature and flow the values occurring in the room are similar to those Saint Gobain regarded as comfort level in winter, or even slightly higher.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

As is to be expected the indoor and outdoor surface temperature of the glazing in the *mur neutralisant* evolve over time, increasing perceptibly to values around 7° C outdoors and 28.4 °C indoors. Therefore, given that the difference in temperature between both models is around 5%, it can be considered that in winter conditions without solar radiation there is adjustment between them.

5. Establishment of other hypotheses on environmental conditions and the operation of the *mur neutralisant*

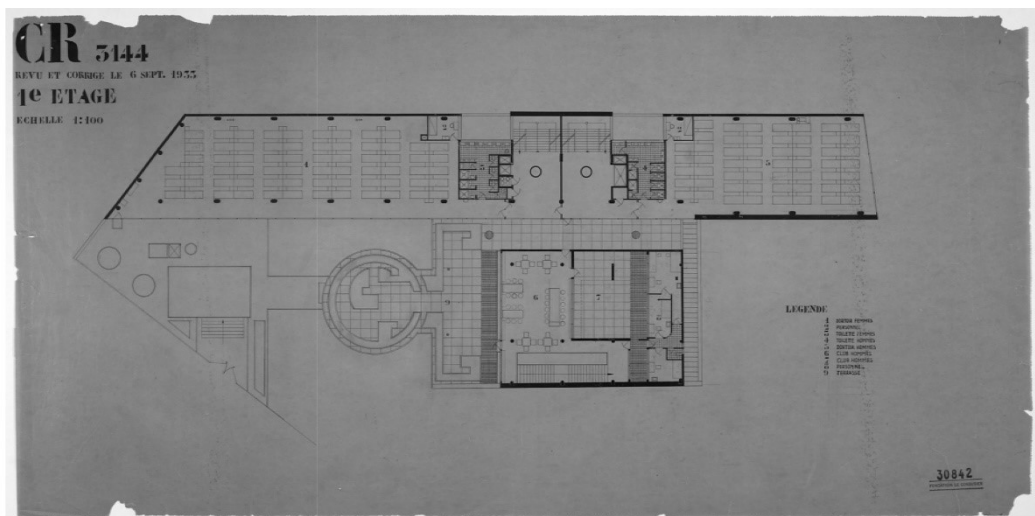
Once the adjustment between both models was established, different hypotheses were proposed for environmental and operation conditions of the *mur neutralisant*, but the CFD model of the test room was replaced with a model of the main dormitory of the City of Refuge (figure 8) (hereafter CR model), with a surface area of 297.67 m². Figure 9a shows this model and figure 9b shows the meshing applied to it. The south-facing façade of the Parisian CR model is a *mur neutralisant* 37.20 m long and 2.80 m high, with a surface area of 104.16 m² and a 110 mm cavity with 7 mm double glazing (7+110+7).



8a. South façade of the City of Refuge¹⁷.

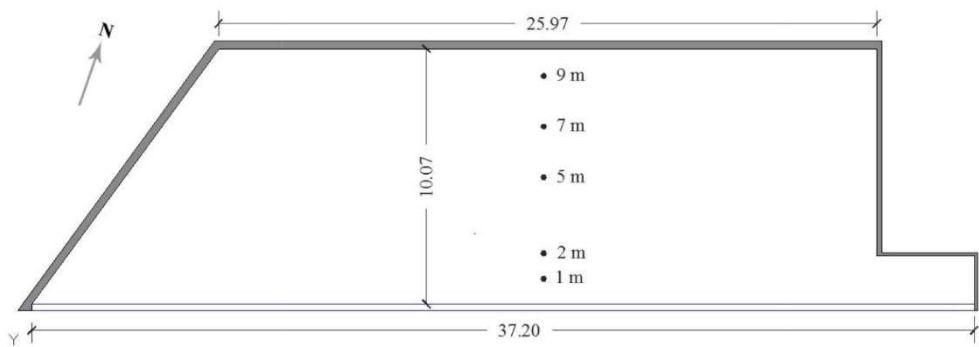
¹⁷Fundation Le Corbusier. CR 3173. FLC 10874. ©FLC-ADAGP

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



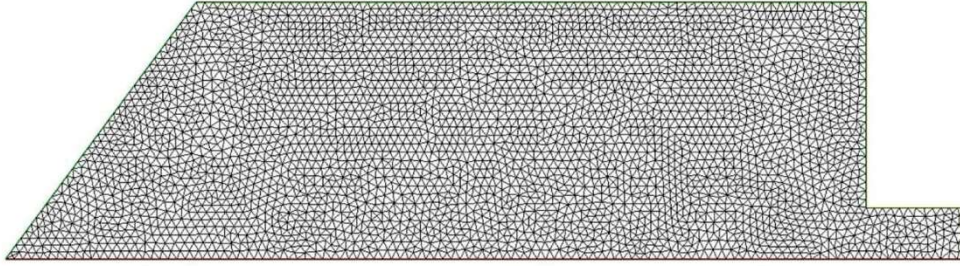
8b. First floor of the City of Refuge¹⁸.

8. Drawings of the City of Refuge. 6 September 1933.



9a. Dimensions and points of measurement in the room in the City of Refuge.

¹⁸Fundation Le Corbusier. CR 3144. FLC 30842. ©FLC-ADAGP



9b. CFD mesh density in the room in the City of Refuge.

9. CFD Model.

5.1 CFD simulations in the City of Refuge model in winter with absence and presence of solar radiation

Simulations were carried out on the CR model from the 27 to 31 December, but the only results specified here are those of the third and coldest day, 30 December, with an outdoor temperature ranging from -6°C at 8:00 h to 1°C at 15:00 h (table 8), once the operating conditions of the thermal system were stabilised. Both the presence and absence of solar radiation -not included by Saint Gobain in the tests- were simulated, in order to assess solar incidence on the evolution of indoor temperatures. The airflow used in the cavity was 100 l/s per metre along the *mur neutralisant*, as recommended by Saint Gobain engineers following the tests. The heat coefficient value (Q) used was the same as that calculated by Saint Gobain engineers for this configuration of *mur neutralisant* and airflows. The following formula, proposed by Lyon, and based on outdoor temperature was used to calculate airflow temperature:

$$\theta_E = 21.6 - \frac{T_f}{5}$$

where θ_E equals airflow temperature and T_f the outdoor temperature, both in $^{\circ}\text{C}$.

However, unlike constant airflow temperature criteria followed in the Saint Gobain tests, a simplification which could be considered as valid given the test duration, our simulations have considered a variable airflow temperature based on outdoor temperature, with no variation given the limited thermal inertia of the *mur neutralisant*. These calculations were spread out over four days, with day-night thermal oscillations, and a maximum value of 7°C was reached on the third day (30 December). Therefore, applying Lyon's formula to each hour of these days, the airflow temperature varies depending on the outdoor temperature.

5.1.1 Simulation with solar radiation

Table 8 shows the results for simulations with solar radiation. The fifth and sixth columns show the respective surface temperatures of the outer and inner glazing of the *mur neutralisant*. The fourth column of the table gives the variable hot airflow temperature in the active chamber, values oscillating from 22.8°C at 8:00 h to 21.4°C at

15:00h. These are relatively low values given the outdoor temperatures and the relatively low airflow, 100 l/s per metre along the *mur neutralisant*, and provide an idea of the efficiency of the thermal system.

Figures 10 and 11 show the results in a horizontal section at 8:00 h and 15:00 h, when the respective minimum and maximum outdoor temperatures are reached. In addition, figure 12 includes a series of graphs of the evolution of the temperature inside the room on the third day at hourly intervals depending on the distance from the *mur neutralisant* as well as its relationship to the outdoor temperature.

As can be seen, the maximum indoor temperatures are reached at 15:00 h and the minimum ones at 7:00 h. The temperatures reached at the same distance from the *mur neutralisant* are fairly uniform throughout the day, with temperature differences between the two test hours of 1.14 °C at 1 m, 0.95 °C at 2 m, 0.49 °C at 5 m, 0.26 °C at 7 m and 0.09 °C at 9 m. This uniformity of temperature therefore increases throughout the day with the distance from the *mur neutralisant*. The thermal uniformity on the outdoor glazing of the *mur neutralisant* is also significant. Although outdoor temperature varied by 7 °C on that day, the superficial temperature of the outdoor glazing only varied by 2.58 °C.

As was to be expected, there is less thermal uniformity in the room, although all its points fall within the temperature comfort band during the day, with a maximum temperature value of 23.73 °C, at 1 m from the *mur* at 15:00 h, and a minimum value of 18.49 °C, at 9 m from the *mur* from 7:00 to 9:00 h. At 15:00 h the difference in temperatures 1 m from the wall and 9 m from the wall (end locations in the room) is 5.15 °C, and at 7:00 h it is 4.10 °C. The difference in the half of the room closest to the *mur neutralisant* is more pronounced, as the differences in temperature 5 m from the *mur neutralisant* and 9 m. from the *mur neutralisant* are 2.41 °C at 15:00 h and 2.01 at 7:00 h.

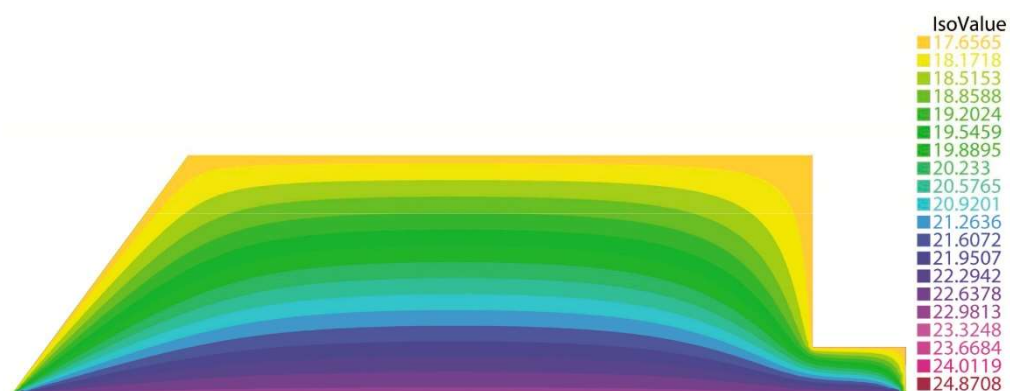
As stated by our research group in the CFD simulations using a numerical model of the combined effect of the *mur neutralisant* and *respiration exacte*, the function of *respiration exacte* is not merely limited to improving indoor air quality but also contributes to greater thermal uniformity in the room, thus improving the comfort conditions of the thermal system¹⁹.

¹⁹Ramírez Balas, C.; Fernández Nieto, E.D.; Narbona Reina, G.; Sendra, J. J.; Suárez, R. "Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a *mur neutralisant*. Application to 'The City of Refuge' by Le Corbusier". *Energy and buildings*. 2015. 86. pp. 708-722.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

30-Dec	Io W/m ²	Text °C	Timp °C	Teg °C	Tig °C	T (1 m) °C	T (2 m) °C	T (5 m) °C	T (7 m) °C	T (9 m) °C
1:00	229	-3.8	22.36	11.92	22.53	22.68	22.16	20.58	19.54	18.51
2:00	228	-4	22.4	11.78	22.5	22.66	22.13	20.56	19.53	18.51
3:00	232	-3	22.2	11.73	22.47	22.62	22.11	20.55	19.52	18.51
4:00	227	-4.2	22.44	11.61	22.45	22.61	22.09	20.53	19.51	18.50
5:00	228	-4	22.4	11.53	22.44	22.59	22.07	20.52	19.50	18.50
6:00	224	-5	22.6	11.39	22.44	22.59	22.07	20.51	19.49	18.50
7:00	225	-4.8	22.56	11.29	22.44	22.59	22.07	20.50	19.49	18.49
8:00	221	-6	22.8	11.13	22.47	22.61	22.08	20.50	19.49	18.49
9:00	226	-5	22.6	11.11	22.49	22.63	22.09	20.51	19.49	18.49
10:00	287	-4.3	22.46	11.31	22.64	22.71	22.14	20.52	19.50	18.50
11:00	628	-4	22.4	11.72	22.95	22.92	22.28	20.56	19.51	18.50
12:00	865	-2	22	12.34	23.30	23.20	22.50	20.64	19.55	18.51
13:00	1017	-0.1	21.62	12.98	23.59	23.46	22.72	20.76	19.61	18.53
14:00	932	0	21.6	13.44	23.78	23.65	22.91	20.89	19.68	18.55
15:00	861	1	21.4	13.69	23.78	23.73	23.02	20.99	19.75	18.58
16:00	531	0	21.6	13.60	23.62	23.66	23.01	21.05	19.80	18.59
17:00	279	-1	21.8	13.34	23.41	23.51	22.92	21.06	19.82	18.60
18:00	237	-2	22	13.05	23.23	23.37	22.80	21.02	19.81	18.60
19:00	236	-2.3	22.06	12.80	23.09	23.24	22.69	20.96	19.78	18.59
20:00	240	-3	22.2	12.56	22.98	23.14	22.59	20.89	19.74	18.58
21:00	244	-4	22.4	12.30	22.91	23.07	22.52	20.84	19.70	18.57
22:00	250	-3.6	22.32	12.13	22.84	23.00	22.46	20.79	19.67	18.56
23:00	257	-3	22.2	12.04	22.78	22.94	22.40	20.75	19.65	18.55
24:00	261	-2	22	12.05	22.71	22.87	22.34	20.71	19.63	18.54

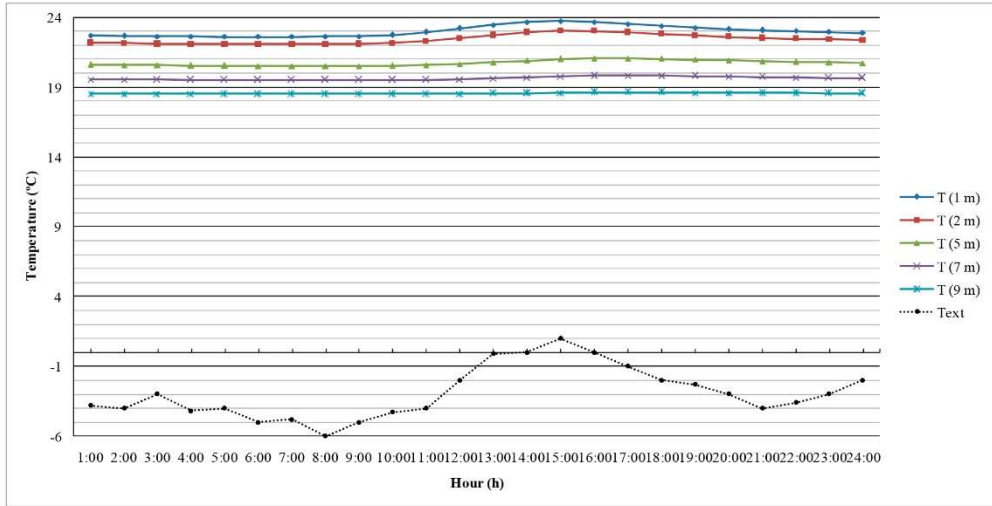
Table 8. Results of the temperatures for the *mur neutralisant* and different points of the room on 30 December, with solar radiation.



10. Results of the CFD simulation (horizontal section of the model) with air heating and solar radiation: 30 December, 8:00 h.



11. Results of the CFD simulation (horizontal section of the model) with air heating and solar radiation: 30 December, 15:00 h.



12. Evolution of indoor temperature at different points in the room for 30 December, with solar radiation, with airflow $q=100$ l/s and a variable airflow temperature in the active chamber.

5.1.2 Simulation without solar radiation

Table 9 and figures 13, 14 and 15 show the same results in the absence of solar radiation, confirming the influence of solar radiation on the operation of the system. Without radiation uniformity throughout the day was very pronounced. In figure 15 the graphs showing the evolution of indoor temperatures at different distances from the *mur neutralisant* are almost straight lines. The maximum difference is 0.12 °C at 1 m from the *mur* compared with 1.14 °C occurring with solar radiation. Uniformity in the surface temperature of the outer glazing is also more pronounced: there is a maximum oscillation of only 0.99 °C in the exterior surface temperature compared with the 7 °C variation in outdoor temperature.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

Equally, thermal uniformity in the room is more pronounced without solar radiation. The maximum indoor temperature is 21.18 °C at 15:00 h and 1 m from the *mur neutralisant*, and the minimum is 18.32 °C at 1:00 h and 9 m from the *mur neutralisant*. There is therefore a difference of only 2.86 °C for these positions and extreme hours. At 15:00 h, the difference between indoor temperature at 1 m and 9 m from the *mur neutralisant* is 2.82 °C, compared with a difference of 5.15 °C occurring with solar radiation.

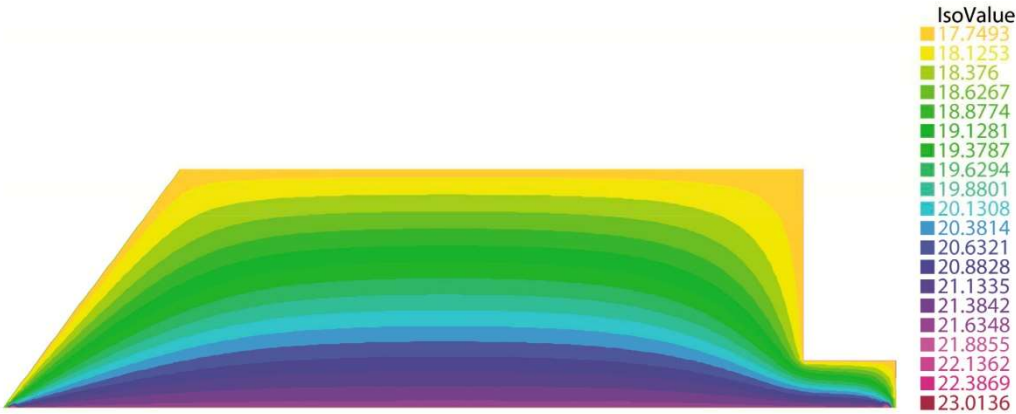
As regards the temperature values reached in both hypotheses it can be observed that at 15:00 h (day), this difference is 2.65 °C at 1 m, 2.18 °C at 2 m, 1.20 °C at 5 m, 0.68 °C at 5 m and 0.18 °C at 9 m, while at 1:00 h (night) the difference is 1.33 °C at 1 m, 1.20 °C at 2 m, 0.77 °C at 5 m, 0.46 °C at 5 m and 0.16 °C at 9m.

It should be noted that based on the solar radiation values extracted from the climate table, 30 December was a fairly sunny day. On an overcast day, the worst case scenario for winter, the results for both hypotheses simulated would be quite similar.

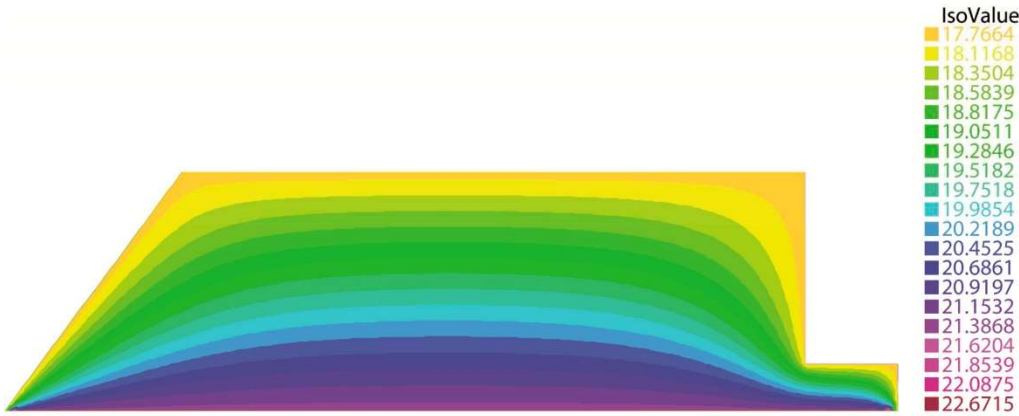
30-Dec	Io W/m ²	Text °C	Timp °C	Teg °C	Tig °C	T (1 m) °C	T (2 m) °C	T (5 m) °C	T (7 m) °C	T (9 m) °C
1:00	0	-3.8	22.36	10.82	21.52	21.10	20.72	19.65	18.98	18.32
2:00	0	-4	22.4	10.73	21.33	21.14	20.76	19.67	18.99	18.33
3:00	0	-3	22.2	10.70	21.54	21.16	20.78	19.69	19.00	18.33
4:00	0	-4.2	22.44	10.62	21.51	21.19	20.81	19.71	19.01	18.34
5:00	0	-4	22.4	10.54	21.69	21.22	20.84	19.73	19.02	18.34
6:00	0	-5	22.6	10.43	21.64	21.26	20.87	19.74	19.03	18.34
7:00	0	-4.8	22.56	10.34	21.85	21.30	20.90	19.76	19.04	18.35
8:00	0	-6	22.8	10.20	21.66	21.34	20.94	19.78	19.05	18.35
9:00	0	-5	22.6	10.17	21.53	21.38	20.97	19.81	19.07	18.35
10:00	0	-4.3	22.46	10.19	21.47	21.39	20.99	19.82	19.08	18.36
11:00	0	-4	22.4	10.24	21.21	21.40	21.00	19.84	19.09	18.36
12:00	0	-2	22	10.42	21.17	21.38	20.99	19.84	19.09	18.36
13:00	0	-0.1	21.62	10.69	21.10	21.32	20.95	19.84	19.09	18.36
14:00	0	0	21.6	10.92	21.04	21.25	20.90	19.81	19.09	18.36
15:00	0	1	21.4	11.16	20.97	21.18	20.84	19.79	19.07	18.36
16:00	0	0	21.6	11.28	21.00	21.13	20.79	19.75	19.05	18.35
17:00	0	-1	21.8	11.29	21.19	21.09	20.76	19.72	19.03	18.34
18:00	0	-2	22	11.23	21.24	21.09	20.74	19.70	19.02	18.34
19:00	0	-2.3	22.06	11.16	21.36	21.09	20.74	19.69	19.01	18.34
20:00	0	-3	22.2	11.05	21.54	21.11	20.75	19.69	19.01	18.33
21:00	0	-4	22.4	10.90	21.45	21.14	20.77	19.69	19.01	18.33
22:00	0	-3.6	22.32	10.82	21.34	21.17	20.79	19.70	19.01	18.33
23:00	0	-3	22.2	10.81	21.15	21.18	20.81	19.72	19.02	18.34
24:00	0	-2	22	10.86	21.12	21.18	20.81	19.72	19.02	18.34

Table 9. Results of the temperatures of the *mur neutralisant* and the room at the different points measured for 30 December, without solar radiation.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

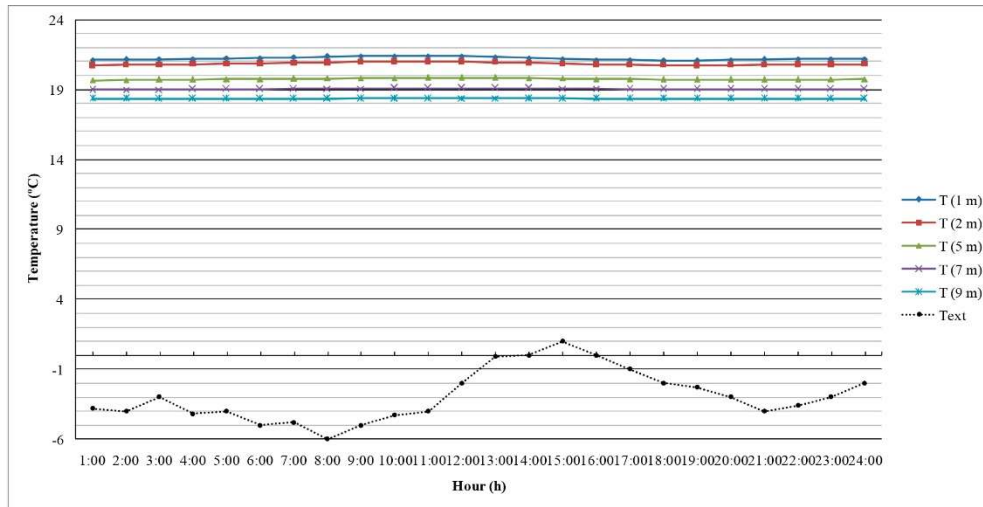


13. Results of the CFD simulation (horizontal section of the model) with air heating and no solar radiation: 30 December, 8:00 h.



14. Results of the CFD simulation (horizontal section of the model) with air heating and no solar radiation: 30 December, 15:00 h.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain



15. Evolution of indoor temperature at different points in the room on 30 December, without solar radiation, with airflow $q=100$ l/s and variable airflow temperature in the active chamber.

5.2 CFD simulations of the City of Refuge model in the summer

Simulations were carried out on the CR model from 29 June to 3 July, but as in the case of winter, only the results for the third and hottest day, 2 July, were specified once the operating conditions of the thermal system were stabilised. In this case only solar radiation was simulated. The airflow selected in the air cavity was also 100 l/s per metre along the *mur neutralisant*. Lyon's formula was also used to calculate the airflow temperature, which was still considered variable depending on outdoor temperature.

Table 10 shows the results for the simulations with solar radiation. The respective surface temperatures of the outer and inner glazing of the *mur neutralisant* are shown in the fifth and sixth columns. The fourth column of the table shows the variable hot airflow temperature in the active chamber, with values ranging from 18.2 °C at 6:00 h to 15.6 °C at 14:00-15:00 h. These are quite high values given the outdoor temperatures and relatively low airflow, 100 l/s per metre along the *mur neutralisant*, and provide an idea of the efficiency of the thermal system.

Figure 16 shows the results in a horizontal section at 15:00 h, when the maximum exterior temperature is reached. In addition, figure 17 includes a series of graphs showing the evolution of the temperature inside the room on the third day at hourly intervals, depending on the distance from the *mur neutralisant* and its relationship with the outdoor temperature.

As can be observed the maximum indoor temperatures are reached between 15:00 and 18:00 h and the minimum temperatures between 6:00 and 8:00 h. Relatively uniform temperatures are obtained throughout the day at the same distance from the *mur neutralisant*, although logically this homogeneity is less pronounced than in winter given the greater incidence of solar radiation and the greater variability in outdoor temperatures, with differences at these extreme times of 3.39 °C at 1 m, 2.92 °C at 2 m, 1.73 °C at 5m, 1.01 °C at 7 m and 0.34 °C at 9 m. Therefore, as in winter, the uniformity of these temperatures increases throughout the day along with the distance from the *mur neutralisant*. The thermal uniformity on the outer glazing of the *mur neutralisant* is also

significant. Although outdoor temperature varies by 13 °C on 2 July, the surface temperature of the outer glazing only varies by 6.33 °C, slightly less than half the previous value.

Although there was less thermal uniformity in the room throughout the day, all points in the room were within the comfort band, with a maximum temperature value of 23.80 °C, 1 m from the *mur neutralisant* at 15:00 h, and a minimum value of 18.27 °C 9 m from the *mur neutralisant* and from 7:00 to 8:00 h, values very similar to those obtained in winter at the same points in the room and at the same time. This shows the potential of the thermal system to maintain similar environmental conditions inside, regardless of the outdoor temperature. At 15:00 h the difference in temperatures 1 m from the *mur* and 9 m from the *mur* (extreme locations in the room) was 5.25 °C, and at 6:00 h it was 2.13 °C. This difference is more pronounced in the half of the room closest to the *mur neutralisant*, as the differences in temperature 5 m from the *mur neutralisant* and 9 m. from the *mur* were 2.38 °C at 15:00 h and 1.10°C at 6:00 h.

As was already stated in the discussion of results for winter with solar radiation, *respiration exacte* contributes to greater thermal uniformity in the room, thus improving the comfort conditions of the thermal system.

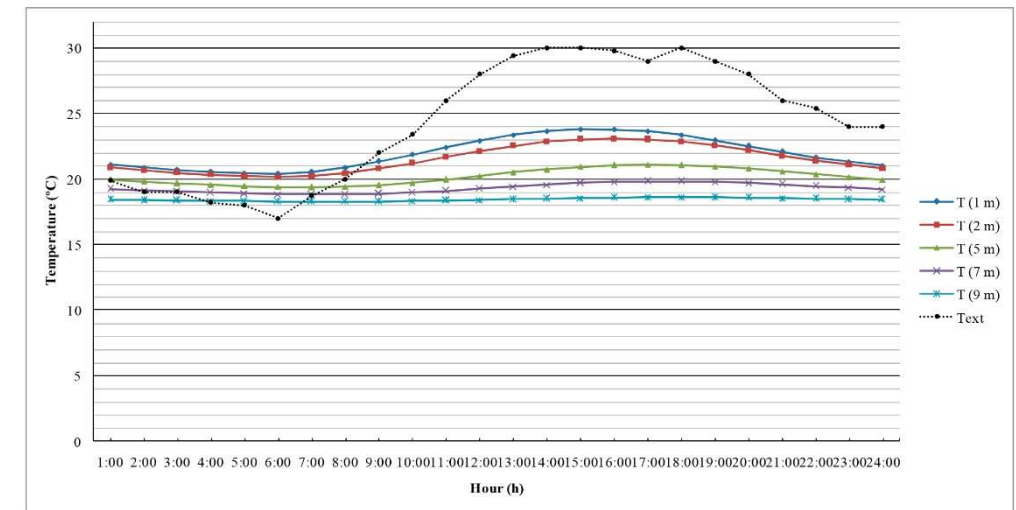
02-Jul	Io W/m ²	Text °C	Timp °C	Teg °C	Tig °C	T (1 m) °C	T (2 m) °C	T (5 m) °C	T (7 m) °C	T (9 m) °C
1:00	344	19.9	17.62	22.13	21.16	21.103	20.874	19.967	19.222	18.414
2:00	339	19	17.8	21.64	20.97	20.89	20.664	19.806	19.119	18.379
3:00	339	19	17.8	20.83	20.66	20.706	20.486	19.67	19.031	18.349
4:00	335	18.2	17.96	20.57	20.57	20.555	20.336	19.556	18.957	18.323
5:00	334	18	18	20.22	20.48	20.434	20.215	19.46	18.895	18.301
6:00	369	17	18.2	20.2	20.5	20.415	20.158	19.386	18.844	18.284
7:00	715	18.7	17.86	20.54	20.72	20.559	20.227	19.359	18.814	18.272
8:00	1127	20	17.6	21.12	21.12	20.881	20.442	19.4	18.819	18.27
9:00	1557	22	17.2	21.85	21.85	21.341	20.789	19.523	18.869	18.283
10:00	1840	23.4	16.92	22.76	22.4	21.872	21.219	19.718	18.965	18.311
11:00	2046	26	16.4	23.77	22.88	22.412	21.68	19.963	19.097	18.353
12:00	2180	28	16	24.76	23.21	22.919	22.131	20.23	19.251	18.402
13:00	2231	29.4	15.72	25.62	23.9	23.351	22.536	20.497	19.41	18.455
14:00	2138	30	15.6	26.23	23.8	23.66	22.852	20.738	19.562	18.506
15:00	1923	30	15.6	26.51	24.03	23.803	23.041	20.929	19.69	18.551
16:00	1591	29.8	15.64	26.53	24.08	23.777	23.085	21.046	19.781	18.585
17:00	1360	29	15.8	26.32	23.87	23.635	23.014	21.087	19.826	18.603
18:00	1140	30	15.6	26.04	23.12	23.362	22.832	21.056	19.828	18.607
19:00	855	29	15.8	25.57	22.84	22.976	22.542	20.955	19.788	18.597
20:00	588	28	16	24.99	22.54	22.518	22.174	20.792	19.708	18.574
21:00	411	26	16.4	24.32	22.09	22.064	21.782	20.583	19.596	18.539
22:00	384	25.4	16.52	23.76	21.37	21.654	21.413	20.358	19.466	18.497
23:00	380	24	16.8	23.21	21.01	21.307	21.087	20.139	19.334	18.453
24:00	382	24	16.8	22.78	20.79	21.004	20.802	19.94	19.21	18.411

Table 10. Results of the temperatures of the *mur neutralisant* and the room at the different points measured on 2 July.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain



16. Results of the CFD simulation (horizontal section of the model) with air heating and solar radiation: 2 July, 15:00 h.



17. Evolution of the indoor temperature at different points in the room on 2 July, with solar radiation, with airflow $q=100$ l/s and variable airflow temperature of the active chamber.

6. Conclusions

The combined technological innovation of the *mur neutralisant* and *respiration exacte* proposed by Le Corbusier, with the help of G. Lyon, constituted a new interpretation of the mechanisation of the environment to solve the control of indoor climate in Modern Movement. Based on the data and conclusions of the *mur neutralisant* tests carried out by Saint Gobain engineers on physical models in test rooms in the 1930s, a numerical model was validated and implemented using the CFD-based program FreeFem++. This made it possible to observe the behaviour the *mur neutralisant* in the City of Refuge would have displayed under different environmental and operating conditions had the original design been completely carried out.

The numerical model allows the energy simulation of the south-facing *mur neutralisant* of the main dormitory in the City of Refuge. The *mur neutralisant* is made up of two sheets of 7 mm glass with a 110 mm active air chamber, a hypothesis which is very similar to that proposed in the original project by Le Corbusier. Airflow in this *mur* was 100 l/s per metre along the *mur neutralisant* at a temperature which varied according to outdoor temperature. In winter conditions, represented by a sunny winter's day in Paris, with outdoor temperatures oscillating between and -6 °C and 1°C on the same day, and with an airflow temperature in the chamber varying between 22.8 °C and 21.4 °C, notably uniform indoor temperatures occur in the room throughout the day at the same distance from the *mur neutralisant*. These temperatures decrease along with the increased distance from the *mur neutralisant* from a mean value of 23 °C 1 m from the *mur neutralisant* to a value of 18.5 °C 9 m from the *mur*, that is to say, at the far end of the room. Despite low winter temperatures, the fact that comfort temperatures are reached in the room with an active air chamber and relatively low airflows (for heating in winter), gives some idea of the energy efficiency of the *mur neutralisant* as a heating system.

In summer conditions, represented by one of the hottest days of the representative climate year in Paris, with outdoor temperatures which on one day oscillate between 17 °C and 30 °C, the airflow temperature in the chamber decreases to values between 18.2 °C and 15.6 °C. The increase in solar radiation entails less thermal uniformity throughout the day compared with the winter day at the same distance from the *mur neutralisant*, although the difference in the middle of the room (5 m from the *mur neutralisant*) is 1.7 °C. The difference in temperature with respect to the distance from the *mur neutralisant* is more pronounced, with mean values ranging from 22 °C at a distance of 1 m from the *mur neutralisant* to 18.5 °C at 9 m from the *mur*, values potentially equivalent to those obtained in winter for the same distances. This demonstrates the potential of the thermal system which results in thermal uniformity at the same distance from the *mur neutralisant* throughout the year. As in the case of the heating operation mode, the relatively low airflow and relatively low airflow temperatures (for cooling in summer) show the energy efficiency of the *mur neutralisant* as a cooling system.

Therefore, the operating conditions of the *mur neutralisant* and the indoor temperature values obtained in both winter and summer confirm that the active thermal system proposed by Le Corbusier for controlling indoor temperatures makes it possible to obtain an *isothermique* thermal environment with similar indoor comfort conditions throughout the year, regardless of outdoor temperature and solar radiation. The energy efficient integrated system of temperature control was incorporated into the building envelope. This comprehensive interpretation of the relationship between architecture and energy was practically half a century ahead of environmental control systems with active façade systems designed with a view to building sustainability and energy efficiency. Had the *mur neutralisant* been executed following the original designs of Le Corbusier and Lyon, it would probably have posed serious competition to the air conditioning systems developed in the 20th century with great success and barely any technological competition.

7. Acknowledgements

The authors wish to thank the Le Corbusier Foundation and researcher Jorge Torres from Universitat Politècnica de València for the information and documentation provided for this study.

8. References

- Brian Brace, T. "Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33". Chicago: University of Chicago Press. 1987.
- Bryan, Harvey. "Le Corbusier and the 'Mur Neutralisant': An Early Experiment in Double Envelope Construction". Proceedings of the Ninth International PLEA Conference. 1991. pp. 257–62.
- Cuadernos de Postgrado. La respuesta de la American Blower Corporation. 24 January 1930.
- FreeFem++ v.-3.37-1. Available from: <http://www.FreeFem.org/ff++/> (22.05.15).
- Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. "Modeling and simulation of a simple glass window". *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2003. 80. pp. 355–374.
- Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. "Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions". *Applied Thermal Engineering*. 2006. 26. pp. 295–302.
- Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. "Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. 48. pp. 461–475.
- Le Braz, J. "La transmission de la chaleur grâverâ travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations". *Glaces et Verres*. 1933. 20. pp. 13.
- Lebel H.; Le Barbier, M. Société Anonyme des Manufactures des Glaces et Produits Chimiques de Saint-Gobain, Chauny et Cirey. Note sur la seconde série d'essais effectués pour la mesure de la transmission de la chaleur à travers les glaces à l'Annexe du Comptoir de Vente, 23 rue Boucry, Paris du 23 Novembre au 21 Décembre 1931. Letter of 11 March 1932.
- Lebel, H.; Le Barbier, M. Société Anonyme des Manufactures des Glaces et Produits Chimiques de Saint-Gobain, Chauny et Cirey. Note sur les essais de transmission de la chaleur à travers les glaces, efectués à l'Annexe du Comptoir de Vente, 23 rue Boucry, Paris du 3 Avril au 8 Mai 1931. Letter of 25 June 1931.
- Ramírez Balas, C.; Fernández Nieto, E.D.; Narbona Reina, G.; Sendra, J. J.; Suárez, R. "Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to 'The City of Refuge' by Le Corbusier". *Energy and buildings*. 2015. 86. pp. 708-722.

7.3. Discusión de resultados

7.3.1 Ajuste y validación del modelo numérico del muro neutralizante

En esta segunda publicación se ha pretendido fundamentalmente validar un primer modelo numérico generado para predecir el funcionamiento del muro neutralizante, tal y como fue proyectado por Le Corbusier, calculado por Lyon y ensayado por los ingenieros de Saint Gobain, como sistema de fachada activo para el acondicionamiento térmico de edificios. Esta validación se considera necesaria para su posterior aplicación a la habitación objeto de estudio de la Ciudad del Refugio con diferentes condiciones ambientales exteriores y operacionales. Este modelo numérico se ha formulado a partir de las investigaciones de Ismail y Henríquez sobre los fenómenos de transmisión de calor, principalmente de radiación, que se producen en fachadas vidriadas [1, 2, 3], basadas en los principios de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Al no haberse llegado a construir el muro neutralizante en la Ciudad del Refugio, el ajuste y posterior validación del modelo numérico se ha podido realizar gracias a los ensayos en modelos físicos realizados a principios de la década de los 30 del pasado siglo por los ingenieros de Saint Gobain con diferentes espesores de vidrios, anchuras de la cámara intermedia y temperatura y caudal del aire de impulsión en dicha cámara. Mediante modelización 3D se ha recreado virtualmente la habitación de ensayo utilizada por los ingenieros de Saint Gobain (Figuras 53 y 54). Posteriormente, con las mismas condiciones ambientales y operacionales, se han realizado simulaciones CFD utilizando el modelo numérico formulado e implementado con el programa de código abierto FreeFem++, con el fin de contrastar los resultados de las mismas con las obtenidas en los ensayos de Saint Gobain (Fig. 55).

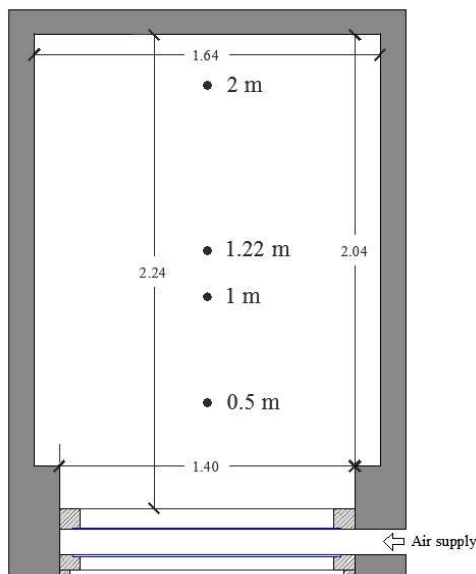


Figura 53. Habitación de ensayo Saint Gobain. Dimensiones y puntos de medición del modelo CFD.

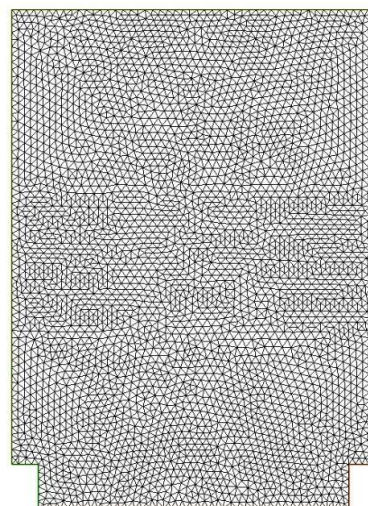


Figura 54. Modelo de la habitación de ensayo Saint Gobain. Densidad de mallado para el cálculo CFD de FreeFem++.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

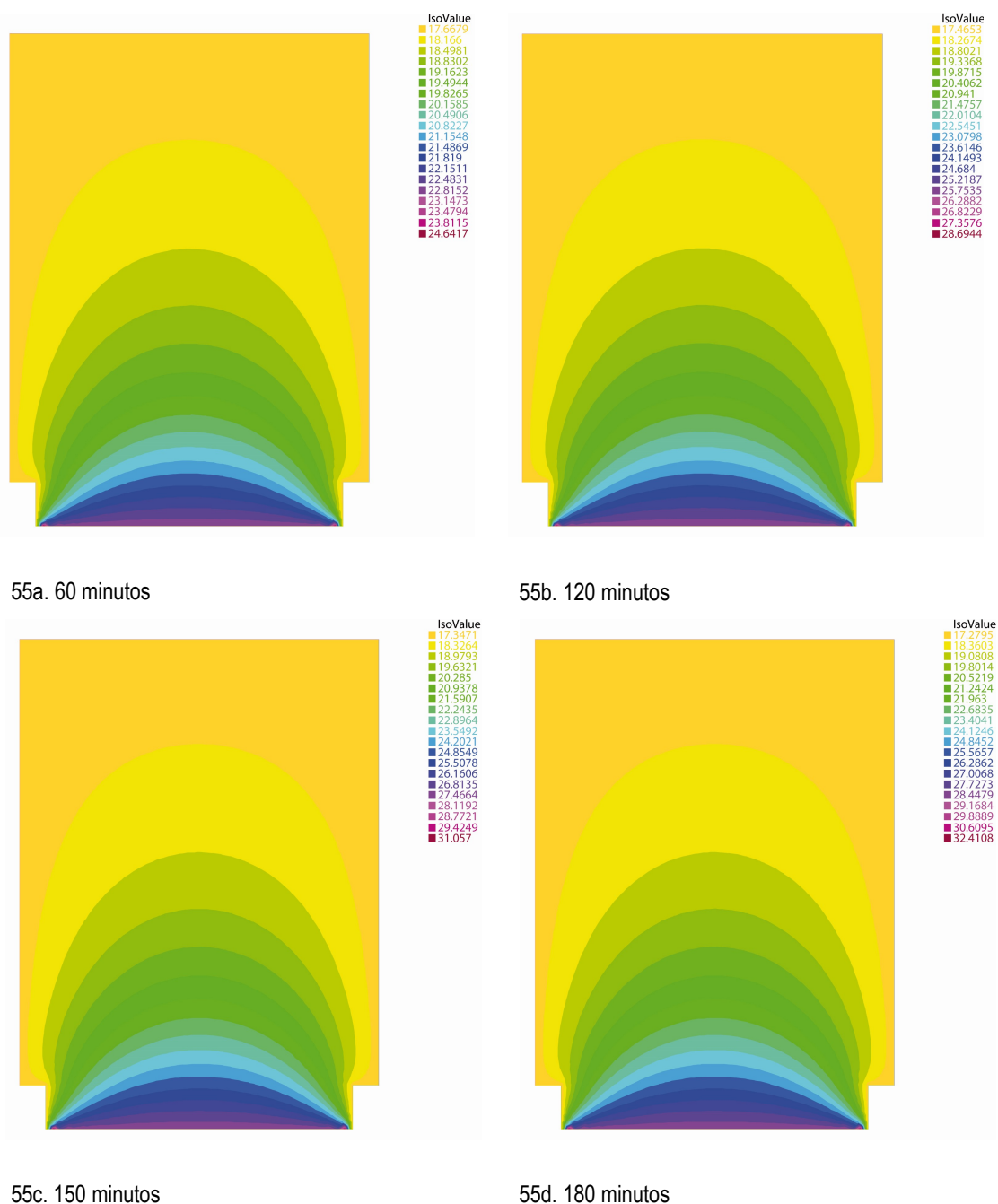


Figura 55. Resultados de las simulaciones CFD en intervalo horario con sistema de calefacción (sección horizontal del modelo).

La diferencia de resultados obtenidos de la temperatura entre ambos, modelo físico y modelo virtual, es del orden del 5%, por lo que se considera alcanzado el objetivo del ajuste del modelo numérico que predice el funcionamiento del muro neutralizante como sistema de calefacción.

7.3.2. Aplicación del modelo numérico del muro neutralizante al caso de estudio

Una vez producido el ajuste, se ha aplicado el citado modelo numérico a la habitación objeto de estudio y en diferentes modos de operación: calefacción (con ausencia y presencia de radiación solar) y refrigeración, para establecer una primera valoración general de comportamiento térmico que genera en ese caso de estudio, aún sin el concurso de la respiración exacta. Para ello, se ha considerado un muro neutralizante compuesto por dos hojas de vidrio de 7 mm, una cámara de aire intermedia de 110 mm, un caudal de impulsión de aire en dicha cámara de 100 l/s por cada metro lineal de muro y una temperatura de impulsión variable en función de la temperatura exterior, parámetros de diseño propuestos por los ingenieros de Saint Gobain tras los ensayos.

7.3.2.1. Simulaciones del modelo en invierno con ausencia y presencia de radiación solar

Se ha simulado el comportamiento térmico generado por el muro neutralizante tanto sin radiación solar como con radiación solar, con el fin de valorar su incidencia en la evolución de las temperaturas interiores de la habitación. Para determinar la temperatura de impulsión del aire en la cámara de aire intermedia entre las dos hojas de vidrio se ha usado la siguiente expresión propuesta por Lyon:

$$\theta_E = 21.6 - \frac{T_f}{5}$$

Donde θ_E es igual a la temperatura de impulsión y T_f la temperatura exterior, ambas en °C.

Ahora bien, a diferencia de estimar una temperatura de impulsión constante, como hizo Saint Gobain en sus ensayos, hipótesis que podría ser válida en ausencia de radiación solar por la poca variación de la temperatura exterior, en las simulaciones se ha considerado una temperatura de impulsión variable en función de la temperatura exterior, sin ningún tipo de desfase dada la escasa inercia térmica del muro neutralizante.

Con una temperatura de impulsión de aire en la cámara intermedia oscilando entre 22.8 °C a las 8:00 h y 21.4 °C a las 15:00 h, valores relativamente bajos dadas las temperaturas exteriores, los resultados de la simulación a esas mismas horas solares de un 30 de diciembre en la ciudad de París, con una temperatura exterior oscilando entre una mínima de -6 °C, a las 8:00 h, y una máxima de 1 °C, a las 15:00 h, y cuando ya se ha producido una estabilización de las condiciones de funcionamiento del sistema térmico, se reflejan en las figuras 56 y 57.

Sin radiación solar la uniformidad térmica a lo largo del día sería muy acusada (Figura 58). El máximo de temperatura interior sería de 21.18 °C a las 15:00 h y a 1 m del muro, y el mínimo sería de 18.32 °C a las 1:00 h y a 9 m del muro; por tanto, solo habría una diferencia de 2.86 °C para esas posiciones y horas extremas. A una determinada distancia del muro neutralizante, las diferencias de temperaturas interiores a

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

lo largo del día serían muy pequeñas, oscilando entre los 0.31 °C, a 1 m del muro, y los 0.04 °C, a 9 m del muro.



Figura 56. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y sin radiación solar: día 30 de diciembre, 8:00 h.



Figura 57. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y sin radiación solar: día 30 de diciembre, 15:00 h.

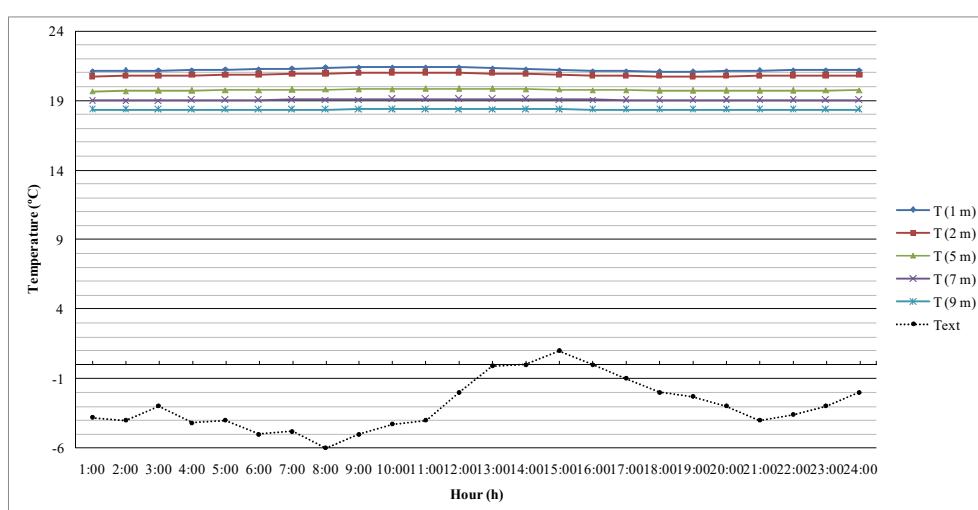


Figura 58. Evolución de la temperatura interior en diferentes puntos de la habitación para el 30 de diciembre, sin radiación solar, con caudal de impulsión $q=100$ l/s y temperatura de impulsión da la cámara activa variable.

En las figuras 59, 60 y 61 se presentan esos mismos resultados de las simulaciones con radiación solar. Como cabía esperar, la uniformidad de la habitación será algo menor que en el caso anterior, aunque todos los puntos de la misma estarían a lo largo del día en el rango de temperaturas de confort, con un valor máximo de la temperatura de 23.73 °C, a 1 m del muro y a las 15:00 h, y un valor mínimo de 18.49 °C, a 9 m del muro y de 7:00 a 9:00 h. A las 15:00 h la diferencia de temperaturas a 1 m del muro y a 9 m del muro (localizaciones extremas de la habitación) sería de 5.15 °C, y a las 7:00 h sería de 4.10 °C. Esas diferencias serían más acusadas en la mitad de la habitación más cercana al muro neutralizante, ya que las diferencias de temperatura a 5 m del muro neutralizante y a 9 m del muro serían de 2.41 °C, a las 15:00 h, y de 2.01, a las 7:00 h, respectivamente.



Figura 59. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y radiación solar: 30 de diciembre, 8:00 h.



Figura 60. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y radiación solar: día 30 de diciembre, 15:00 h.

7. Ajuste del modelo predictivo del muro neutralizante a partir de los resultados de los ensayos realizados en su día por Saint Gobain

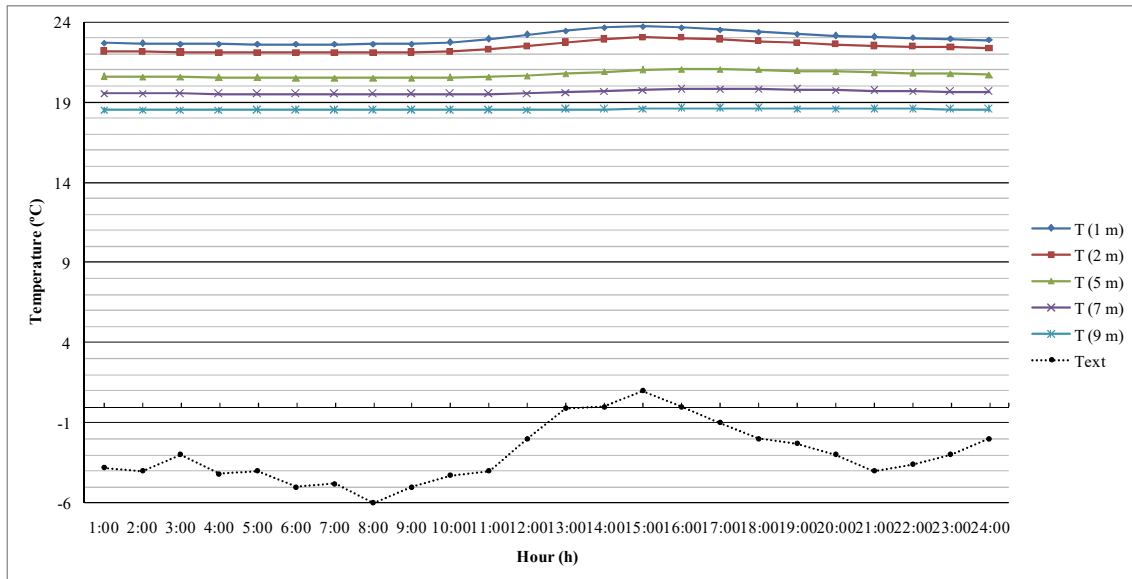


Figura 61. Evolución de la temperatura interior en diferentes puntos de la habitación para el 30 de diciembre, con radiación solar, con un caudal de impulsión $q=100$ l/s por cada metro lineal y una temperatura de impulsión variable en la cámara activa.

7.3.2.2. Simulaciones del modelo en verano

Con una temperatura de impulsión del aire en la cámara intermedia oscilando entre 18.2 °C, a las 6:00 h, y 15.6 °C, a las 14:00-15:00 h, valores relativamente altos, los resultados de la simulación a las 15:00 h (hora solar en la que se alcanza la máxima temperatura) de un 2 de julio en la ciudad de París, con una temperatura exterior oscilando entre una mínima de 17 °C, a las 6:00 h, y una máxima de 30 °C, a las 15:00 h, y cuando ya se ha producido una estabilización de las condiciones de funcionamiento del sistema térmico, se reflejan en las figuras 62 y 63.

Como era de esperar, la uniformidad térmica es menor que en el caso de invierno, aunque todos los puntos de la misma están a lo largo del día en el rango de temperaturas de confort, con un valor máximo de la temperatura de 23.80 °C, a 1 m del muro y a las 15:00 h, y un valor mínimo de 18.27 °C, a 9 m del muro y de 7:00 a 8:00 h. A las 15:00 h la diferencia de temperaturas a 1 m del muro y a 9 m del muro (localizaciones extremas de la habitación) es de 5.25 °C, y a las 6:00 h es de 2.13 °C. Esa diferencia es más acusada en la mitad de la habitación más cercana al muro neutralizante, ya que las diferencias de temperatura a 5 m del muro neutralizante y a 9 m. del muro es de 2.38 °C a las 15:00 h y de 1.10 °C a las 6:00 h.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.



Figura 62. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y radiación solar: 2 de julio, 15:00 h.

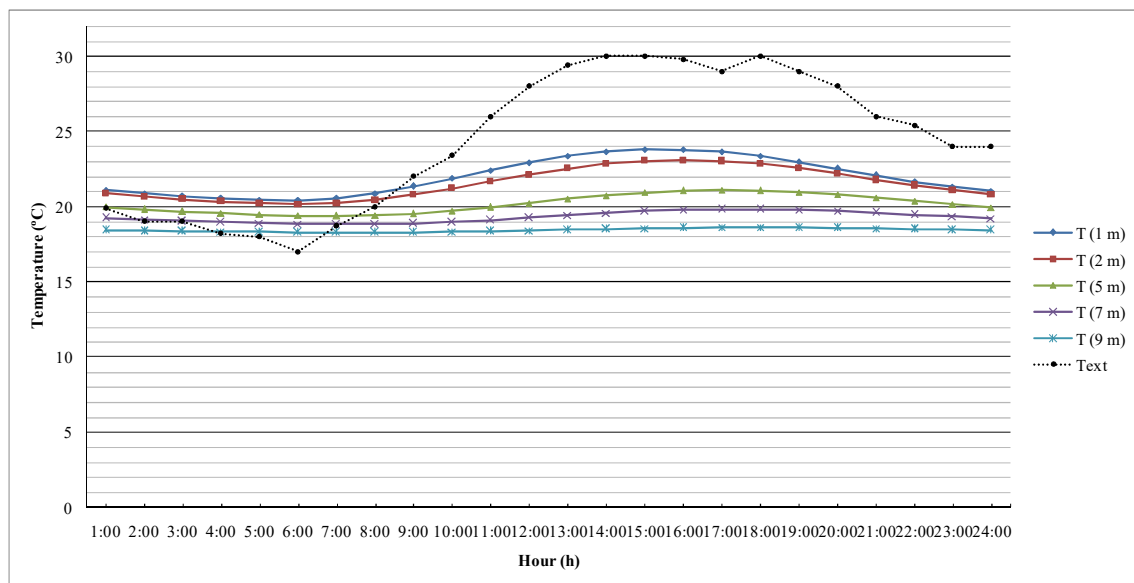


Figura 63. Evolución de la temperatura interior en diferentes puntos de la habitación para el 2 de julio, con radiación solar, con un caudal de impulsión $q=100$ l/s por cada metro lineal y una temperatura de impulsión da la cámara activa variable.

Los valores de temperatura interior son muy similares a los alcanzados en invierno en esos mismos puntos de la habitación a esas mismas horas solares, lo que muestra el potencial que tiene el sistema térmico de mantener unas similares condiciones ambientales en el interior, con independencia de la temperatura exterior. A ello se le une el hecho de que, con un caudal de impulsión de aire frío o caliente relativamente bajo: 100 l/s por cada metro lineal de muro, se consigan temperaturas de confort en la habitación con temperaturas de impulsión de aire en la cámara intermedia relativamente bajas en invierno y altas en verano, por lo que el consumo que se precisará para calentar el aire en invierno o enfriarlo en verano sería reducido, un claro indicador de la eficiencia energética de este sistema térmico.

1 Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2003). Modeling and simulation of a simple glass window. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80, 355–374. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.08.010>

- 2 Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2005). Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48. 461–475.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.022>
- 3 Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2006). Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, 26, 295-302.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.023>

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

8. Modelo numérico simplificado del efecto combinado del muro neutralizante y respiración exacta

Nombre y adscripción de autor y coautores.

Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to “The City of Refuge” by Le Corbusier.

Cristina Ramírez Balas, Enrique D. Fernández Nieto, Gladys Narbona-Reina, Juan José Sendra Salas, Rafael Suárez Medina.

Referencia completa de la revista o editorial de publicación.

Energy and Buildings 2015. Vol. 86, Pag. 708-722. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.032>. Indexada en JCR (Q1).

8.1. Resumen

Tras la validación del modelo numérico que predice el funcionamiento del muro neutralizante como sistema térmico, descrito en la anterior publicación, esta tercera publicación tiene como principal objetivo formular un nuevo modelo numérico para la evaluación del comportamiento térmico en la habitación objeto de estudio cuando actúan, de modo combinado, el muro neutralizante y la respiración exacta, tal y como fueron proyectados por Le Corbusier. Se trata de un modelo numérico simplificado, ya que la metodología se aplica para resolver la combinación de ambos efectos mediante el uso de un código acoplado que considera la distribución de temperaturas del dormitorio principal de la Ciudad del Refugio como un problema bidimensional (2D), mientras que el muro neutralizante se plantea como un problema unidimensional (1D).

El modelo numérico está basado en los principios de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes combinadas con una ecuación de convección-difusión para la resolución total del problema termodinámico, habiendo sido programado con el software de código abierto FreeFem++.

La aplicación de este modelo permite obtener conclusiones acerca del comportamiento térmico que hubiera habido en la habitación objeto de estudio de haberse ejecutado estas innovaciones tal y como las proyectó Le Corbusier. Se han obtenido las condiciones ambientales interiores tanto con la habitación de la Ciudad del Refugio vacía como ocupada, considerando una ratio de 1 pers./ 4 m². Una vez lograda la estabilización de las condiciones de funcionamiento del sistema térmico, en invierno, impulsando 100 l/s aire caliente por cada metro lineal de muro en la cámara intermedia a temperatura constante: 30 °C (+10 °C respecto la temperatura interior de confort), e impulsando 300 m³/h de aire de la ventilación en la habitación a 20 °C, la temperatura media de ésta, con ocupación, es de 23.5 °C, por tanto, 3.5 °C superior a la temperatura del

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

aire impulsado por la respiración exacta, mientras que, sin ocupación, ese incremento es lógicamente algo inferior: en torno a 2 °C. En verano, tras la estabilización de las condiciones de funcionamiento del sistema térmico, impulsando 100 l/s de aire frío por cada metro lineal de muro en la cámara intermedia a 15 °C (-10 °C respecto de la temperatura interior de confort), e impulsando 1050 m³/h de aire de la ventilación en la habitación a 25 °C, la temperatura media de ésta, cuando está ocupada, se eleva a 26,5 °C por tanto, solo 1.5 °C superior a la de la respiración exacta; mientras que, sin cargas de ocupación, ese aumento de la temperatura se reduce a 0.5 °C.

8.2. Publicación



Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a *mur neutralisant*. Application to “The City of Refuge” by Le Corbusier

C. Ramírez-Balas^{a,*}, E.D. Fernández-Nieto^b, G. Narbona-Reina^b, J.J. Sendra^a, R. Suárez^a

^a Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain

^b Departamento de Matemática Aplicada I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 July 2014

Received in revised form 14 October 2014

Accepted 16 October 2014

Available online 28 October 2014

Keywords:

Mur neutralisant

Respiration exacte

Le Corbusier

The City of Refuge

Active façade system

Double skin façade (DSF)

Computational fluid dynamics (CFD)

Numerical simulation

ABSTRACT

This paper examines a mathematical model of the thermal evolution in a specific room of “The City of Refuge”, built in Paris (1933) by Le Corbusier. Although the architect proposed an environmental conditioning system by combining two technological advances: the *mur neutralisant* – a double-glazed wall with an air cavity that can be heated or cooled – and the *respiration exacte* – a purified circulating air maintained at constant temperature –, this was never incorporated. This article aims to acquire knowledge of indoor air distribution in the room under study by considering the combination of the *mur neutralisant* and the *respiration exacte*.

The problem is resolved through a “coupled code”. The first is a two-dimensional model simulating the temperature evolution in the room, while the second is a one-dimensional model used to represent the problem of the *mur neutralisant*. The numerical model develops the technical issues associated with the implementation of computational fluid dynamics (CFD).

The numerical simulations carried out validate the solution of the system proposed. Control of the façade temperature using the active chamber ensures that the operative temperatures obtained for summer and winter fall within the comfort range. The City of Refuge is the clearest precursor of modern active façade systems.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The case study analyses the atmosphere of the City of Refuge in Paris (1929–1930), an experimental building in which Le Corbusier attempted to implement two of his own discoveries, the *mur neutralisant* and the *respiration exacte*, to support his concept of *machine à habiter* and to show the adaptation of new glass architecture to environmental conditions. The combined use of these two elements aimed to maintain indoor comfort temperature and ideal indoor air quality conditions throughout the year, regardless of outdoor environmental conditions.

To do so, the large glazed south façade would be composed of the *mur neutralisant*, with double sheets of glass and an active air chamber, into which air was to be introduced in order to maintain a constant indoor temperature regardless of the season (Fig. 1(a)). *Respiration exacte*, a ventilation system completely independent

from this wall while acting in conjunction with it, would guarantee a suitable indoor air quality in the building, and would contribute to the indoor thermal quality of rooms with a *mur neutralisant* (Fig. 1(b)) [1].

The City of Refuge, belonging to the Salvation Army, was a building designed for the homeless [2]. It could house up to 600 people, distributed in large dormitories and “roomettes”, small rooms used mainly for single women with children. For the City of Refuge to be more than a mere shelter for the night it required installations on several levels that could operate throughout the day, meeting the needs of its occupants [3].

The building was placed in an urban context, but practically isolated from other buildings. It is composed of a basement floor, for workshops, laundry rooms and machine rooms; the “pilotis” floor, used for workshops, kitchens and conference rooms; and the ground floor, used for access (see Fig. 2). The *mur neutralisant* was meant to be executed between the first and fifth floors, acting as the envelope for the female dormitories – the first floor case study – as well as for the smaller rooms between the second and fifth floors [4].

Respiration exacte was finally installed in the City of Refuge in Paris, but not so the *mur neutralisant*, which was never

* Corresponding author. Tel.: +34 686911248.

E-mail addresses: cristinaramirez@us.es (C. Ramírez-Balas), edofer@us.es (E.D. Fernández-Nieto), gnarbona@us.es (G. Narbona-Reina), jsendra@us.es (J.J. Sendra).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.032>
0378-7788/© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

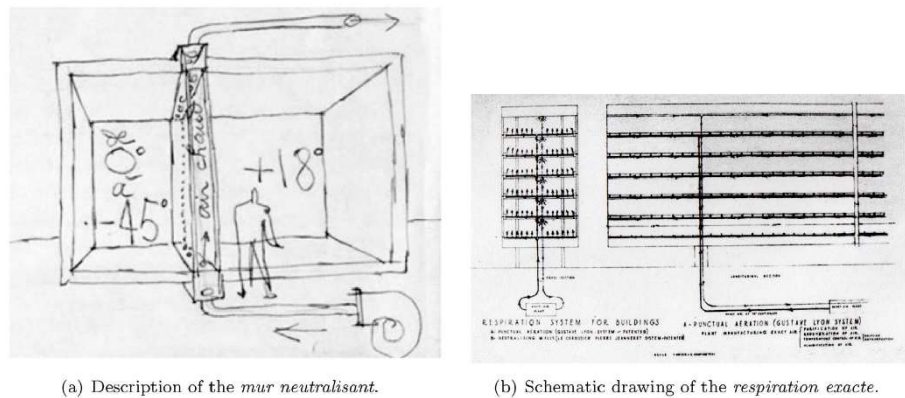


Fig. 1. Sketches by Le Corbusier about The City of Refuge.

incorporated for financial reasons and technical concerns. It was replaced with a *pan de verre* similar in appearance to the *mur neutralisant*, but with quite different thermal behaviour, creating the need for a traditional heating system installation, although the building lacked a cooling system. This makes it impossible to establish its behaviour as an environmental conditioning solution

in relation to the building façade, either alone or in combination with the *respiration exacte*.

Although the construction of the *mur neutralisant* had been ruled out, Le Corbusier reserved the space for its construction and maintained an interest in the results it would have produced had it been executed. This interest led engineers from the Saint Gobain

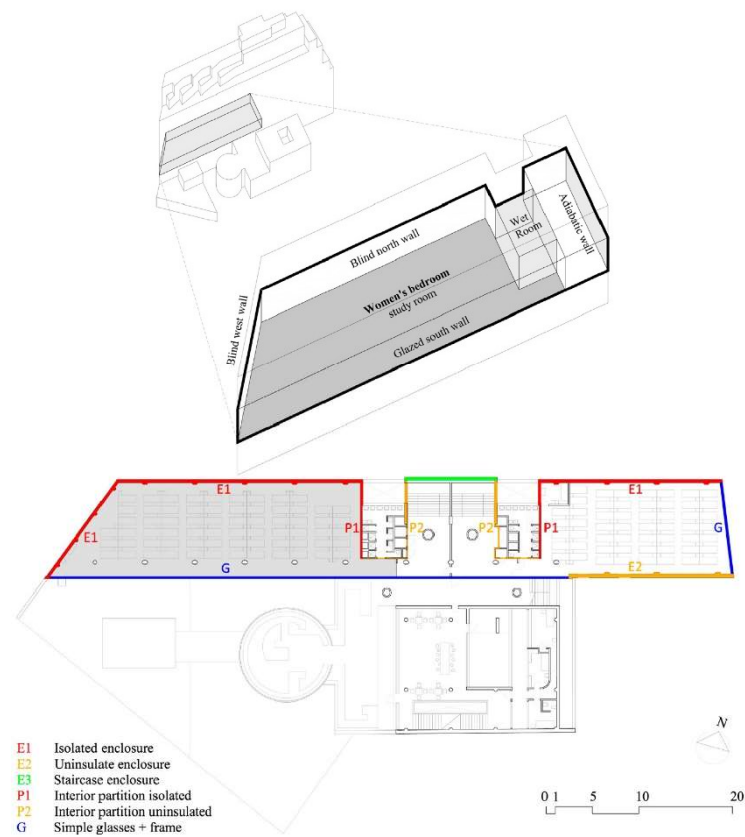


Fig. 2. Situation of the case study in the City of Refuge and detail of the first floor.

company to resume trials in August 1932, when the *pan de verre* had already been installed in the City of Refuge.

Several tests were carried out on different types of glazing in order to verify the coefficients for heat transmission proposed by G. Lyon, and to check the operation of the air heating system of the active chamber [5].

These trials provided the heat transmission coefficients for different types of glazing: 2 mm, 7 mm and 12 mm double glazing with a 100 mm active chamber.

The following conclusions were reached from the result of the trials [6]:

- A maximum impulse flow of 60 l/s was to be ensured.
- The maximum width of the active chamber should be set at 100 mm, since at greater widths the convection currents would cause a reduction in heat exchange and an increase in thermal loss.
- A thermal difference of at least 10°C should be maintained between the airflow to the exterior from the chamber and the indoor temperature of the heated room, in order to compensate for thermal loss.

This research aims to resolve the physical problems resulting from the combination of the *mur neutralisant* and the *respiration exacte* and establish what the real system behaviour would have been if both these innovations had been implemented in the City of Refuge as planned by Le Corbusier and calculated by G. Lyon (Fig. 1(b)).

The *mur neutralisant* is composed of a 7 mm double glass sheet with an active inner chamber measuring 100 mm, through which hot or cold air was circulated depending on the time of the year in order to provide active thermal isolation (see Fig. 1(a)). This system is extremely difficult to model and simulate. In fact, current energy and environmental computer simulation programs, such as DesignBuilder [7], cannot be used for this system, especially not combined with Le Corbusier's mechanical ventilation system, *respiration exacte*. Therefore FreeFem++ software (v. –3.20) was chosen [8]. This program uses C++ language to process and calculate all sorts of mathematical codes and solution methods for assessment with computational fluid dynamics (CFD). Specific models and programs were created for this study using algorithms integrating all phenomena and physical characteristics in order to reproduce the combination of both of Le Corbusier's systems for the City of Refuge.

The energy models generated take into account climate conditions in Paris, profiles of usage and operating conditions, and the spatial and material characteristics of the envelope of the City of Refuge. This made it possible to calculate the main parameters of the thermal environments of the room studied and to carry out graphic representations of the evolution of interior climate in relation to variations in exterior climate: differences in temperature, airflows, thermal radiation, etc. In short, simulation using FreeFem++ codes makes it possible to reliably predict what the interior temperature of the spaces designed would be.

Given the interest in the progress and development of energy efficiency systems and energy preservation in buildings, double skin façades (DSF) are currently a major research topic as studies of Joe et al. [9] and Ghadimi et al. [10]. In [11], Shameri et al. analyse different elements relating to the design of DSFs, such as geometrical characteristics, types of glass, natural lighting, wind loads. Ventilation and solar protection systems are the most important systems in the inner chamber of the double skin given the reduction in thermal gain produced through the envelope.

Zhou et al. [12] present the main methods for the analysis of the thermal behaviour of DSFs, developed to prevent overheating, mainly for cold climate zones in winter and warm climates in summer. The application of ventilated DSFs with an integrated

and controlled solar protection device makes it possible to control the building's thermal conditions in these sorts of climates.

Research by Chen et al. [13] uses a mathematical model for a glass double skin façade with slats in the inner air chamber to reduce solar gains in climates with warm summers.

At present, models and simulation using programmed software are some of the most powerful tools available for research on thermal behaviour and fluid dynamics in ventilated DSFs, known as Active Transparent façades (ATFs), as one of three different façade analysed through 3D computational fluid dynamics (CFD) in the study of Brandl et al. [14]. For example, Ismail et al. present a two-dimensional model with numerical simulation of heat transfer in single glazing [15]. This model is based on an energy equation applying the terms of absorbed, transmitted and reflected solar radiation, as well as exterior and interior convection flows through the glass, depending on the incident solar radiation and outdoor temperature. This initial research serves as an introduction to the problem and was subsequently developed by the same authors [16], paying special attention to the effects of mass flow in the chamber between the double glazing in order to determine the superficial temperature of the inside glass. They establish how the increase in mass flow of the natural ventilation reduces total heat gain in comparison with a single glazed window. Research by Ismail et al. [17] was taken into consideration when establishing the mathematical model for the *mur neutralisant* case study. These authors describe a transitory two-dimensional model formulated using basic mass and energy conservation equations associated with variations in climate and atmospheric conditions. Thus, the results are obtained for the temperatures along and through the air chamber with mechanical ventilation. This study examines a numerical method different to that proposed by Ismail et al. [17] or Liu et al. [18], discretising the equation into partial differentials which define the model for studying the evolution of temperature in the *mur neutralisant*. These calculations also take into consideration the coupling of the *mur neutralisant* and the evolution of indoor temperatures.

This article has mainly been prompted by the lack of research focusing jointly on the simulation of the *mur neutralisant* and *respiration exacte*. The implementation and subsequent simulation using FreeFem++ entails two main tasks. The first is the coupling of a 1D and 2D model. Physical problems and solution methods are applied to the problem of *respiration exacte* (2D model), a code for an implicit resolution of the problem of the *mur neutralisant* (1D model) and finally, a coupled code for the correct operation of the combination of *mur neutralisant* and *respiration exacte*. The second task is the definition of the mathematical codes in the 1D model, since an implicit method of finite volumes should be established as a resolution procedure, in order to optimize simulation time for the problems of the *mur neutralisant* with respect to the problem of *respiration exacte* (2D model) with minimum margin of error in the solutions.

2. Coupled model for the temperature evolution problem

This section defines the mathematical model proposed to solve the temperature evolution problem. The main objective is to assess the influence of the *mur neutralisant* on the temperature of the room with the *respiration exacte* system. As mentioned above, the problem is divided into two physical systems: the *mur neutralisant* is examined using a 1D problem, while a 2D problem is used to evaluate the indoor temperature.

Fig. 3 shows a diagram of the operation of the coupled problem. Thus, in order to establish a final time t_f , it is necessary to first solve the 2D problem and obtain the indoor temperature, T_{int} . This data is then used to resolve the 1D problem, calculating the temperature

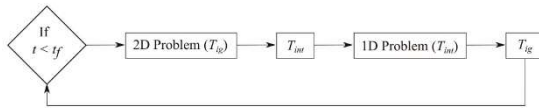


Fig. 3. Diagram of the operation of the coupled 1D–2D problems.

of the internal glass, T_{ig} , which is embedded into the 2D problem as a boundary condition.

In order to give a complete graphic description of the whole domain we show in Fig. 4 the schematic representation of the studied room (2D problem) and a cross section of the *mur neutralisant* (1D problem). In the following subsections we detail the numerical approximations of the 1D and 2D models.

2.1. Evolution of indoor temperature (2D problem)

Temperature evolution is simulated using a convection–diffusion problem. Since the room is affected by a *respiration exacte* system, it is necessary to first calculate the velocity field to be used by the convection phenomena. This problem is modelled on the Navier–Stokes equations, and the unknowns are the velocity field (solution of the Navier–Stokes problem) and the temperature (solution of the convection–diffusion problem). The density is assumed

to be constant and the fluid is incompressible. Here we consider a study domain Ω with boundaries Γ_i ($i = 1, \dots, M$). We assume that the initial glass wall is located on the boundary Γ_1 and the entrance of the *respiration exacte* is made through the boundary Γ_3 , the rest of the boundaries are assumed to be internal walls. For the case of the City of Refuge the schedule of the domain Ω is shown in Fig. 4, the corresponding boundaries are represented in Fig. 7. The system required is written as

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla - \nabla \cdot (v \nabla \vec{u}) + \nabla q = \vec{g} & \text{in } \Omega \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 & \text{in } \Omega \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T - k \Delta T = \varphi & \text{in } \Omega \\ T = T_{ig1d(m)} & \text{on } \Gamma_1 \\ T = T_{extef} & \text{on } \Gamma_3 \\ T = T_{rad} & \text{on } \Gamma_2 \cup \Gamma_4 \cup \dots \cup \Gamma_M \end{cases} \quad (1)$$

with initial condition

$$T(0) = T_{op} \text{ in } \Omega.$$

where \vec{u} , velocity field; T , temperature; t , time; $v = (\mu/\rho)$, kinematic viscosity; $q = (p/\rho)$, pressure; $\vec{g} = (\dot{f}/\rho)$, density of the heating

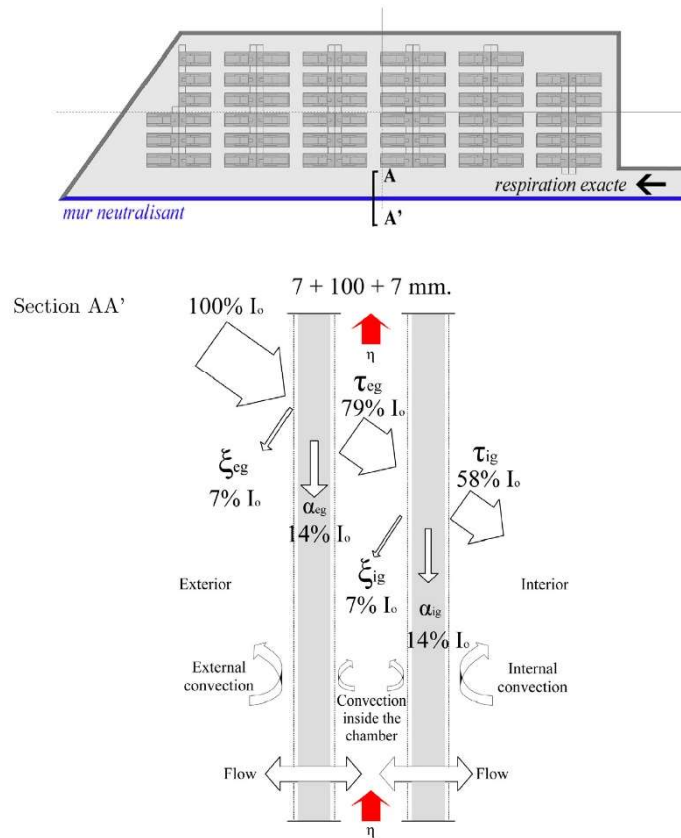


Fig. 4. Complete physical domain and detail of physical phenomena in the *mur neutralisant*.

source due to the radiation; k , thermal diffusion coefficient; φ , source term due to the occupancy.

The different notations for boundary conditions are as follows: $T_{ig1d(m)}$ is the temperature of the internal glass wall, imposed on the boundary Γ_1 . This value is obtained by averaging the temperature obtained by the 1D problem on the internal glass. T_{rad} is the heating temperature of the walls enclosing the room. These walls are labelled $\Gamma_2, \Gamma_4, \dots, \Gamma_M$, with $(M-1)$ being the number of boundaries considered in the internal walls (see Fig. 7). Thus, it is possible to impose different heating temperatures in each of them. The boundary Γ_3 is used to simulate the entrance of the *respiration exacte*, so T_{extef} is the temperature of this incoming flow. Finally, T_{op} is the initial temperature assumed for the room over the domain Ω .

The numerical approximation of this problem was carried out using the mixed $\mathbb{P}_2 - \mathbb{P}_1$ Finite Element method. FreeFem++ software was used for the computing implementation.

$$\begin{cases} (\rho c V)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\eta c \frac{\partial T_f}{\partial z} + U_c A (T_{eg} - T_f) + U_c A (T_{ig} - T_f) \\ (\rho c V)_{eg} \frac{\partial T_{eg}}{\partial t} = U_{ext} A (T_{ext} - T_{eg}) + U_c A (T_{f,i} - T_{eg}) + \sigma \varepsilon_{eg} (T_{ext}^4 - T_{eg,i}^4) + \alpha_{eg} I_o + Q_{eg} \\ (\rho c V)_{ig} \frac{\partial T_{ig}}{\partial t} = U_{int} A (T_{int} - T_{ig}) + U_c A (T_f - T_{ig}) + \sigma \varepsilon_{ig} (T_{int}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig} \end{cases} \quad (2)$$

2.2. Simulation of the mur neutralisant (1D problem)

2.2.1. The mur neutralisant

The solution proposed, though not incorporated, by Le Corbusier was that of a double plane of glass with air recirculation in the inner chamber heated/cooled by the building's air conditioning system to provide greater thermal insulation than that provided by openings with single glazing or with double glazing and passive air chambers. Controlling the temperature of the interior air of the chamber

glass used in this study. The outer pane receives 100% of the incident solar radiation, 7% of which is reflected to the exterior environment, with 14% being absorbed by the outer pane. The remaining 79% of energy incides on the interior glass, where 7% is transmitted to the chamber through reflection and 14% is absorbed by the inner pane. Therefore, the total energy transmission to the interior environment is 58% of the incident solar radiation. In addition, the convection phenomenon is considered a result of heating the panes of glass in surfaces in contact with the exterior and interior, as well as in surfaces in contact with the air chamber.

2.2.2. Mathematical model and numerical approximation

The problem involves the temperature of the three parts of the *mur neutralisant*. T_f denotes the temperature of the fluid inside the wall cavity, while T_{eg} and T_{ig} represent the temperatures of the external and internal glass respectively. The problem is then solved by the following system of partial differential equations:

with $z \in [0, L]$, L being the length of the *mur neutralisant* and $t \in [t_0, t_M]$ the time (see specific notation in Appendix B).

The previous model (2) can be represented as a system of equations under the time derivative of the three temperatures of the fluid, internal and external glass as follows:

$$\begin{cases} \partial_t T_f = g_f(t, T_f, T_{eg}, T_{ig}), & t \in [t_0, t_M] \quad z \in [0, L] \\ \partial_t T_{eg} = g_{eg}(t, T_f, T_{eg}, T_{ig}) \\ \partial_t T_{ig} = g_{ig}(t, T_f, T_{eg}, T_{ig}) \end{cases}$$

where

$$\begin{cases} g_f(t, T_f, T_{eg}, T_{ig}) = -\eta c \frac{\partial T_f}{\partial z} + U_c A (T_{eg} - T_f) + U_c A (T_{ig} - T_f) \\ g_{eg}(t, T_f, T_{eg}, T_{ig}) = U_{ext} A (T_{ext} - T_{eg}) + U_c A (T_f - T_{eg}) + \sigma \varepsilon_{eg} (T_{ext}^4 - T_{eg,i}^4) + \alpha_{eg} I_o + Q_{eg} \\ g_{ig}(t, T_f, T_{eg}, T_{ig}) = U_{int} A (T_{int} - T_{ig}) + U_c A (T_f - T_{ig}) + \sigma \varepsilon_{ig} (T_{int}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig} \end{cases} \quad (3)$$

would depend on exterior climate conditions for each day and hour of study.

The problem is considered as a system consisting of two sheets of glass, 7 mm thick and 2.8 m long (L), separated by a width $W=0.10$ m, forming an active air chamber with a constant temperature. Below is a detailed description of the phenomena and parameters which affect the increase in temperature and are caused mainly by the incidence of solar radiation on the glazed façade. For this purpose, solar radiation was considered as the sum of the amount of solar energy directly received, both diffused and reflected, together with convection and airflow phenomena (Fig. 4).

Finally, the upper and lower parts of the ends of the glazing were considered adiabatic, since Le Corbusier planned to prolong the construction of the *mur neutralisant* from the first to the fifth floor. Thus, we analyse a floor of height 2.8 m as a part of the complete 5 m wall where the *mur neutralist* is installed (see [16]). The conditions for the ends in contact with the indoor and outdoor environments were obtained through the energy balance carried out in the DesignBuilder simulation [7].

The different forms of heat transfer considered were taken into account in the formulation of the problem using the data for the

The unknowns of the problem are functions in time and space,

$$T_f = T_f(t, z), \quad T_{eg} = T_{eg}(t, z), \quad T_{ig} = T_{ig}(t, z).$$

Thus, the numerical approximation begins by defining a partition of the independent variables t and z .

- A uniform partition of the interval $[t_0, t_M]$ with $M+1$ points is considered. That is, M subintervals of length $\Delta t = ((t_M - t_0)/M)$, so the partition is defined as

$$t_k = t_0 + k \Delta t, \quad k = 0, 1, \dots, M.$$

- A uniform partition of the space interval $[0, L]$ given by the points is considered

$$z_{i+1/2} = i \Delta z, \quad i = 0, \dots, n,$$

n being the number of subintervals composing $[0, L]$, that is, $\Delta z = (L/n)$.

A semi-implicit Euler method in time and a finite volume approximation for the space variable are considered to solve the system. Thus,

$$\{(T_{f,i}^k, T_{eg,i}^k(z), T_{ig,i}^k(z))\}, \quad k = 0, \dots, M, \\ i = 1, \dots, n,$$

the approximated unknowns in time t_k in the control volume $[z_{i-1/2}, z_{i+1/2}]$. That is,

$$T_{f,i}^k \approx \frac{1}{\Delta z} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} T_f(t_k, z) dz.$$

When the finite volume method is applied, the temperature of the fluid inside the wall cavity at the interface point $z_{i+1/2}$ is approximated $T_{f,i+1/2}^{k+1}$. Taking into account that the air flow is rising, an upwind method is used to approximate it by $T_{f,i}^{k+1}$.

The evolution in time is then combined with this space approximation by using the semi-implicit Euler method. The solution is obtained from the following system:

$$\begin{cases} T_{f,i}^{k+1} = T_f^k + \Delta t g_{f,i}^{k+1} \\ T_{eg,i}^{k+1} = T_{eg}^k + \Delta t g_{eg,i}^k \\ T_{ig,i}^{k+1} = T_{ig}^k + \Delta t g_{ig,i}^k \end{cases}$$

where

$$g_{f,i}^{k,k+1} = -\eta c \frac{T_{f,i}^{k+1} - T_{f,i-1}^{k+1}}{\Delta z} + U_c A(T_{eg,i}^k - T_{f,i}^k) + U_c A(T_{ig,i}^k - T_{f,i}^k),$$

$$g_{eg,i}^k = U_{ext} A(T_{ext,i}^k - T_{eg,i}^k) + U_c A(T_{f,i}^k - T_{eg,i}^k) + \sigma \varepsilon_{eg} ((T_{ext,i}^k)^4 - (T_{eg,i}^k)^4) + \alpha_{eg} I_o^k + Q_{eg,i}^k,$$

$$g_{ig,i}^k = U_{int} A(T_{ind}^k - T_{ig,i}^k) + U_c A(T_{f,i}^k - T_{ig,i}^k) + \sigma \varepsilon_{ig} ((T_{ind}^k)^4 - (T_{ig,i}^k)^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o^k + Q_{ig,i}^k.$$

Furthermore, it must be taken into account that for the first space subinterval the boundary condition is the temperature of the entrance air into the wall cavity. This is the value of $T_{f,0}^{k+1}$. The net heating radiation transference calculation, $Q_{ig,i}$ and $Q_{eg,i}$, is specified in the following subsection.

2.2.3. Radiation method

This section presents the radiation method used to determine the net heating radiation transfer, $Q_{ig,i}$ and $Q_{eg,i}$, for one of the surfaces with respect to the other surfaces of the wall cavity. The energy balance for a surface i with area A_i is described as:

$$\frac{Q_i}{A_i} = J_i - G_i \quad (4)$$

where J_i is the radiation energy ratio that leaves the surface and G_i is the irradiation ratio received by the surface. These are determined as follows:

- G_i , the irradiation ratio received, is calculated as the sum of the form-factor F_{ij} between the point z_i of the external glass and the point z_j of the internal glass:

$$G_i = \sum_{j=1}^n F_{ij}, \quad (5)$$

- The form-factor for two parallel sheets of glass, F_{ij} , can be deduced through the phenomena represented in Fig. 5 leading to the expression (6),

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

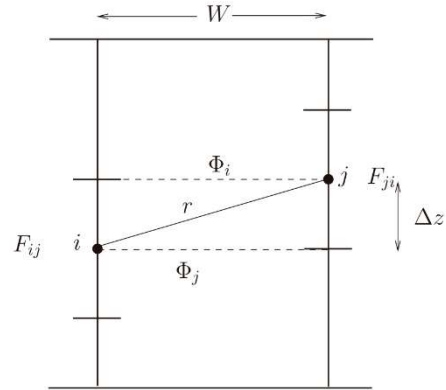


Fig. 5. Form-factor between the two parallel sheets of glass of the *mur neutralisant*.

where

- r is the distance between the middle point of each horizontal partition n of the external glass (points i) and the middle point of the horizontal partition n of the internal glass (points j).

- ϕ_i is the angle between the normal vector of each partition of the external glass i with respect to r for each partition j of the internal glass.
- ϕ_j is the angle between the normal vector of each partition of the internal glass j with respect to r for each partition i of the external glass.
- A_i is the area of the surface i .

Given the geometry of the problem it can be seen that $\phi_i = \phi_j$ and the areas are equal to Δz . Thus,

$$F_{ij} = \frac{\Delta z (\cos \phi_i)^2}{\pi r^2}.$$

Moreover, the form-factor can be explicitly expressed in terms of spatial dimensions. If defining the middle points $y_0 = (i - (1/2))\Delta z$ and $y_1 = (j - (1/2))\Delta z$, then $r = \sqrt{W^2 + (y_1 - y_0)^2}$ where W is the distance between the two sheets of glass. This results in $\cos \phi_i = (W/r)$ and finally:

$$F_{ij} = \frac{\Delta z (\cos \phi_i)^2}{\pi r^2} = \Delta z \frac{W^2}{\pi r^4}. \quad (7)$$

- J_i is the ratio of radiation energy that leaves the surface per unit area. It is defined in terms of the physical properties of the different types of glass: the emissivity (ε), the Stefan-Boltzman constant (σ) and the density (ρ) through the relation

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i G_i. \quad (8)$$

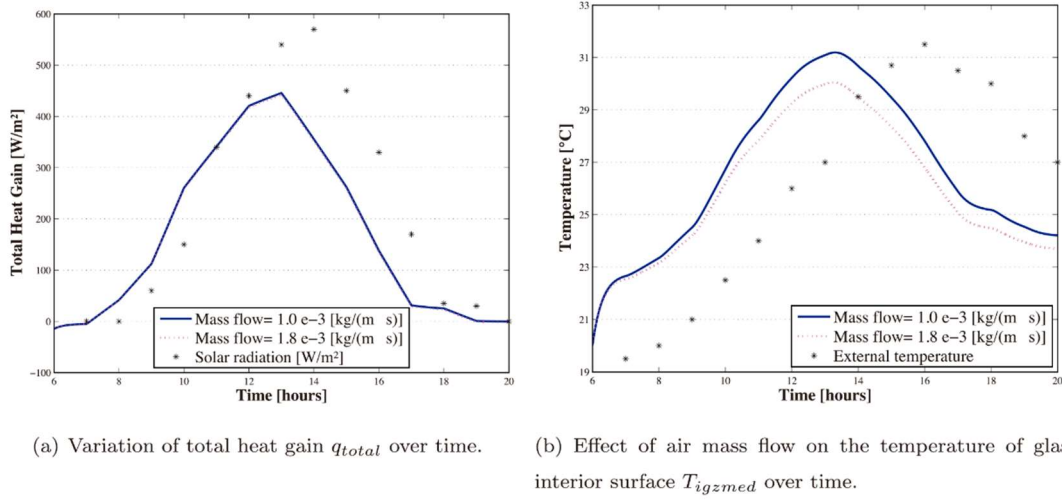


Fig. 6. Testing prescriptive model.

The wall cavity is defined as two parallel planes with a temperature gradient along these surfaces. By dividing each of these into n segments of equal length, as was done for the internal and external glass, it is assumed that each segment is an isothermal surface of the wall cavity, for a total of $2n$ surfaces.

For the calculation of the radiation heating transfer in the cavity surfaces it is necessary to apply the previous equation for each of the n partitions of the two sheets of glass.

The following equation details the amount of radiation heating exchange between each point i (for $i = 1, \dots, n$) of the internal surface of the external glass and the internal surfaces $n + 1$ to $2n$ of the internal glass and viceversa.

$$\begin{cases} J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=n+1}^{2n} F_{ij} J_j, & i = 1, \dots, n \\ J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j, & i = n + 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (9)$$

This linear system must then be solved with unknowns $\vec{J} = \{J_i\}_{i=1}^{2n} \in \mathbb{R}^{2n}$ which are expressed in compact form as:

$$A\vec{J} = \vec{b}$$

with $A \in \mathcal{M}_{2n \times 2n}$, $\vec{b} \in \mathbb{R}^{2n}$ given by,

$$A = \begin{pmatrix} I & A_{1,2} \\ A_{2,1} & I \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \{\varepsilon_i \sigma T_i^4\}_{i=1}^{2n}.$$

The matrix $I \in \mathcal{M}_{n \times n}$ represents the identity matrix of dimension n and $A_{1,2} \in \mathcal{M}_{n \times n}$, $A_{2,1} \in \mathcal{M}_{n \times n}$ are defined as

$$A_{1,2} = \begin{pmatrix} (\varepsilon_1 - 1)F_{1,n+1} & (\varepsilon_1 - 1)F_{1,n+2} & \dots & (\varepsilon_1 - 1)F_{1,j} & \dots & (\varepsilon_1 - 1)F_{1,2n} \\ (\varepsilon_2 - 1)F_{2,n+1} & (\varepsilon_2 - 1)F_{2,n+2} & \dots & (\varepsilon_2 - 1)F_{2,j} & \dots & (\varepsilon_2 - 1)F_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varepsilon_i - 1)F_{i,n+1} & (\varepsilon_i - 1)F_{i,n+2} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{i,j} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{i,2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varepsilon_n - 1)F_{n,n+1} & (\varepsilon_n - 1)F_{n,n+2} & \dots & (\varepsilon_n - 1)F_{n,j} & \dots & (\varepsilon_n - 1)F_{n,2n} \end{pmatrix},$$

$$A_{2,1} = \begin{pmatrix} (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,1} & (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,2} & \dots & (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,j} & \dots & (\varepsilon_{n+1} - 1)F_{n+1,n} \\ (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,1} & (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,2} & \dots & (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,j} & \dots & (\varepsilon_{n+2} - 1)F_{n+2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varepsilon_i - 1)F_{i,1} & (\varepsilon_i - 1)F_{i,2} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{i,j} & \dots & (\varepsilon_i - 1)F_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,1} & (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,2} & \dots & (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,j} & \dots & (\varepsilon_{2n} - 1)F_{2n,n} \end{pmatrix}.$$

Table 1
Prescriptive model characteristics.

Properties	External glass	Channel gap	Internal glass
Thickness (m)	e_{eg} 0.007	e_c 0.003	e_{ig} 0.007
Emissivity	ξ_{eg} 0.08		ξ_{ig} 0.08
Absorptance	α_{eg} 0.06		α_{ig} 0.06
Transmission	τ_{eg} 0.86		τ_{ig} 0.86
Density (kg/m ³)	ρ_{eg} 2500	ρ_f 1293	ρ_{ig} 2500
Specific heat (J/kg/K)	c_{eg} 750	c_f 1004	c_{ig} 750
Thermal resistivity (m K/W)	$R_{ee} + R_{eg}$	R_f	$R_{gi} + R_{ig}$
	0.04 + 0.0025	0.125	0.0025 + 0.18

3. Numerical models

The numerical results of the models proposed previously are presented in this section. These models are first validated comparing them with the results obtained in Ismail et al. [17] and followed by the study carried out on the City of Refuge. The study specifically analyses temperature and total heat gain, q_{total} , defined as follows:

$$q_{total} = \Delta x \sum_{j=1}^n U_{int}(T_{ind} - T_{ig}) + \Delta x U_c(T_f - T_{ig}) + \Delta x \sigma \varepsilon_{ig}(T_{ind}^4 - T_{ig}^4) + \alpha_{ig} \tau_{eg} I_o + Q_{ig}. \quad (10)$$

3.1. Testing prescriptive model

Firstly, the method proposed by Ismail et al. [17], is used to validate the numerical program, using the same values for the surrounding conditions and meteorological conditions. The characteristics of the prescriptive model of the glazed system used as a starting point are shown in Table 1.

Following the description of the characteristics of the prescriptive model the results featured in the following graphs for heat transfer (q_{total}) and evolution of temperature in the interior glass surface at mid height (T_{igzmed}) are assessed. When compared with the results obtained by Ismail et al. [17], the numerical solution of this model first shows that the behaviour in the graphs is the same, and secondly, that the values obtained coincide with those of the prescriptive model (Fig. 6).

3.2. Proposed model applied to the City of Refuge

The case study is geometrically defined following the plans obtained from the Le Corbusier Foundation. The final construction plans of the City of Refuge, from September 1933, were used in surveys for each of the levels in order to obtain a better understanding of the building and to choose the room for study: the women's dormitory on the first floor, to the left of the staircases (Fig. 2), which had the greatest surface area, 295 m², the longest length of *mur neutralisant*, 37.2 m, and highest occupancy, 67 beds.

The surrounding conditions imposed in the two-dimensional model (see Section 2.1) correspond to each of the enclosures defined in Fig. 7, in a horizontal section carried out at a height of 2.35 m, at a level with the impulse grid for air ventilation.

Three types of *mur neutralisant* were proposed and tested by Saint Gobain in August 1932 [6], with measurements 2 + 100 + 2, 7 + 100 + 7 and 12 + 100 + 12 mm. This allowed a precise and rigorous assessment of the true conditions under which the *mur neutralisant* system might have operated, had it been incorporated, bearing in mind that Le Corbusier reserved a space for the possible incorporation into the wall of 7 + 100 + 7 mm glazing at a later stage.

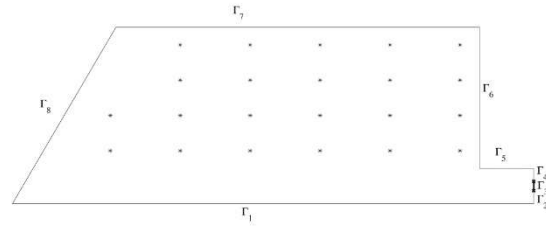


Fig. 7. Labels corresponding to each of the surrounding conditions of the room studied and probes of internal points where the temperature is measured (marked with asterisks).

We perform the numerical simulation of this type of glass chosen by Le Corbusier.

Fig. 4 shows the properties of the physical phenomena for the specific *mur neutralisant* system simulated, including the percentages of solar radiation transmitted through the *mur neutralisant*. All the values for emissivity, absorptance, transmission, density, specific heat and thermal resistance of glazing have been taken from the data provided by Saint Gobain [19], Table 2.

The value of $T_{ig1d(m)}$, which is the temperature of the glazed enclosure, is imposed on boundary Γ_1 . This value is obtained from the result of the 1D problem which simulates the evolution of temperatures in the *mur neutralisant*. The radiant temperature of the interior enclosures of the room studied is imposed on boundaries Γ_2 , Γ_4 , Γ_5 , Γ_6 , Γ_7 y Γ_8 (see Fig. 7). T_{extef} is imposed on boundary Γ_3 . This corresponds to the point where the flow for the *respiration exacte* is boosted. T_{op} is the initial operative temperature in the room studied over the space Ω .

The source term due to the occupancy, involved in the evolution of the temperature in the room (Eq. (1)) for the 2D problem, is calculated according to a ratio of 25 person/m² and an energy charge of 46 W/person. This is defined as follows:

$$\varphi = \frac{0.25 \text{ person/m}^2 \cdot 46 \text{ W/person}}{\rho c_f H} = 0.00316 \text{ K/s} \quad (11)$$

where ρ is the air density (kg/m³), c_f the specific heat of the air (kg/J/K) and H the height of the room (m).

Initial radiant temperature conditions obtained from the simulations with the DesignBuilder energy simulation tool have only been used as a starting point for the initial radiant temperature conditions of the room studied. See Appendix A for details.

3.2.1. Initial conditions

In this subsection we specify the initial conditions for the problem. The numerical simulations are developed for two representative days in winter and summer, namely, August 15 and December 30. The calculations are made referring to solar time. The total time of the numerical simulation is two solar days (48 h) and the initial data specified here refers to the first solar time hour.

Table 2
Properties of simulation hypothesis 7 + 100 + 7 mm.

Properties	External glass	Channel gap	Internal glass
Thickness (m)	e_{eg} 0.007	e_c 0.10	e_{ig} 0.007
Emissivity	ξ_{eg} 0.07		ξ_{ig} 0.07
Absorptance	α_{eg} 0.14		α_{ig} 0.14
Transmission	τ_{eg} 0.79		τ_{ig} 0.79
Density (kg/m ³)	ρ_{eg} 2500	ρ_f 1293	ρ_{ig} 2500
Specific heat (kg/J/K)	c_{eg} 750	c_f 1004	c_{ig} 750
Thermal resistivity (m K/W)	R_{eg}	R_f	R_{ig}
	0.17545	0.125	0.17545

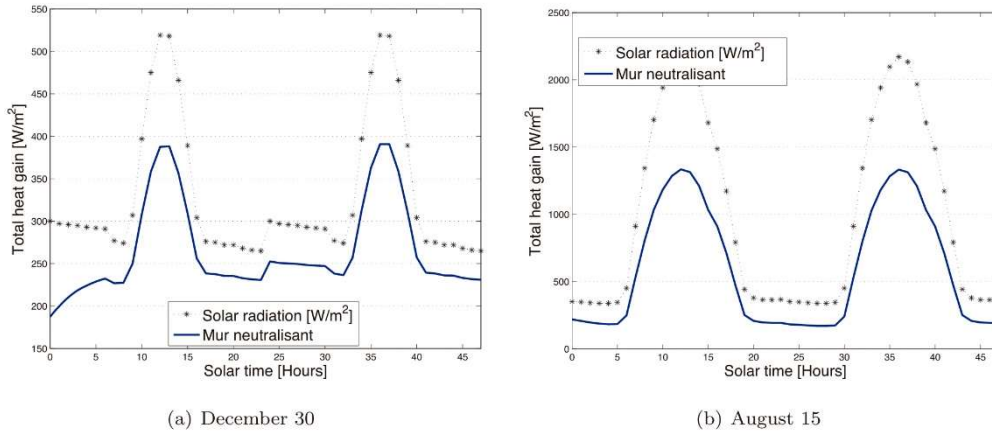


Fig. 8. Total heat gain in the *mur neutralisant* for the two days under study.

• *Initial climate conditions*

The climate files for Paris Orly were used, considering exactly the same files used by DesignBuilder. See [Appendix A](#).

• *Initial temperatures and impulse flow in the mur neutralisant (1D problem)*

As was mentioned above, for the initial temperature conditions a previous calculation was performed using the simulations of DesignBuilder, based on the EnergyPlus simulation tool. The resulting data gives an initial temperature in the interior of the room of 27.58°C for summer and 7.14°C for winter. The initial temperatures for the internal glass and the temperature of the room are the same, so $T_{int} = T_{igini} = 27.58^\circ\text{C}$ in summer and $T_{int} = T_{igini} = 7.14^\circ\text{C}$ in winter. The external glass is supposed to be at the same exterior temperature, so $T_{egini} = 19.7^\circ\text{C}$ in summer and $T_{egini} = -3.8^\circ\text{C}$ in winter.

In order to establish the impulse temperature of the active chamber, a 10°C thermal leap was considered in relation to the temperature of the desired indoor temperature of the room: 20°C in winter and 25°C in summer. Therefore, the constant impulse temperatures in the active chamber are set to 30°C in winter and 15°C in summer.

The Saint Gobain technicians had established that high flows (120 l/s and 150 l/s) increased energy losses as a result of the turbulence inside the active chamber, with a decrease in the heat exchange between fluid and glass surfaces. A more appropriate 60 l/s flow was chosen for the air impulse flow into the active chamber. To introduce this data into the FreeFem++ code, it is necessary to relate this flow to the mass flow which is the quantity that is really imposed. Thus, we calculate the mass flow η to be imposed as follows:

$$\eta = \rho \cdot v = \frac{\rho \cdot q}{S} = \frac{1.293 \text{ kg/m}^3 \cdot 60 \text{ l/s} \cdot 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ l}}{0.10 \text{ m} \cdot L} = \frac{0.7758}{L} \text{ kg/s m} \quad (12)$$

where ρ is the air density (kg/m^3), v the velocity (m/s), q the impulse flow (m^3/s), and S the surface area of the passage section where the *respiration exacte* is implemented (m^2). Note that this quantity is normalized with a characteristic length L associated to the dimension of the 3D case which is avoided in the 2D calculation ($L = 1$ in simulations).

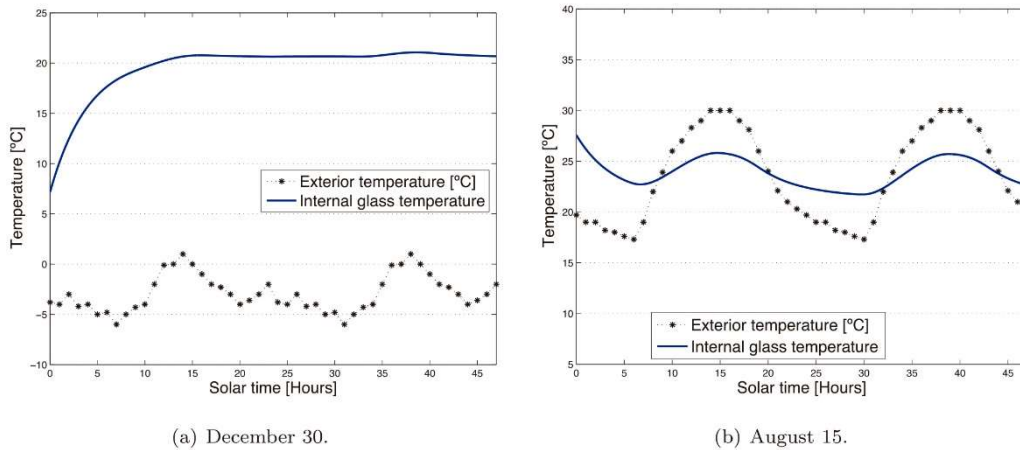


Fig. 9. Evolution of the temperature of the internal glass surface for the two days under study.

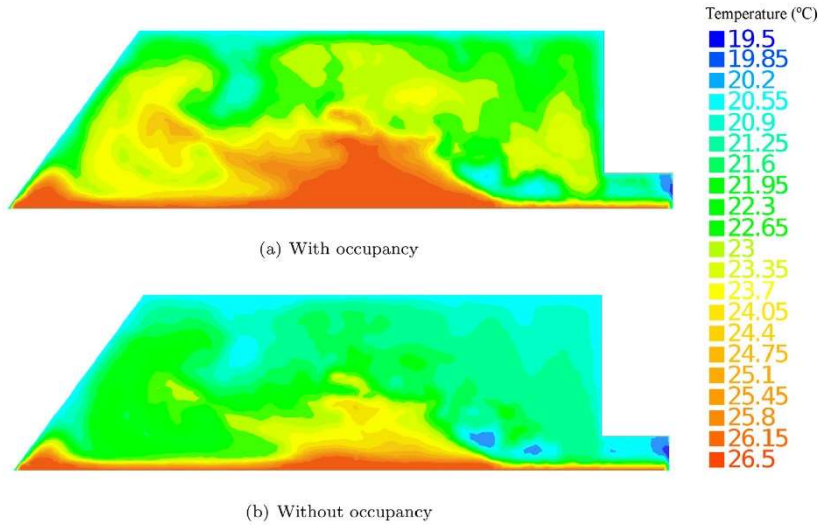


Fig. 10. Simulation at the middle of the pane height for December 30, after 25 h, (with *respiration exacte* temperature at 20 °C and *mur neutralisant* temperature at 30 °C).

- *Initial temperatures and impulse flow in the room (2D problem)* The impulse temperature at the *respiration exacte* is fixed at 20 °C in winter and 25 °C in summer. These are the desired indoor temperatures stated in the tests carried out by Saint Gobain. The initial temperature conditions in the interior of the room have already been specified, 7.14 °C for winter and 27.58 °C for summer.

3.2.2. 1D model results

First, we study the evolution of the temperatures in the *mur neutalisant*, by considering a constant temperature in the room. The objective is to study the influence of the external temperature, radiation and the temperature of the air impulsed between the glass,

on the temperature of the internal glass. Therefore, for the first test it is enough to consider the numerical simulation produced with the 1D code described in Section 2.2.2.

• *Evolution of heat transfer*

First, we study the relation of the heat transfer (q_{total}) in the *mur neutalisant* to the solar radiation.

Fig. 8 represents the evolution over time of the total heat gain together with the solar radiation for both cases. In the case of the summer day (Fig. 8(b)), the maximum heat transfer difference occurs at 12:00 h each day when there is 2200 W/m² solar radiation in the exterior. Heat transfer to the interior atmosphere for 7 mm glass manages to transfer 63.3% which does not seem to

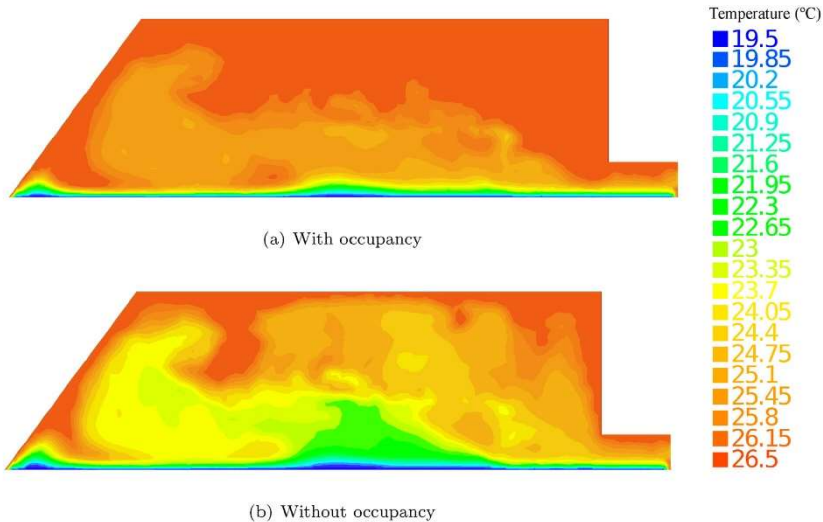
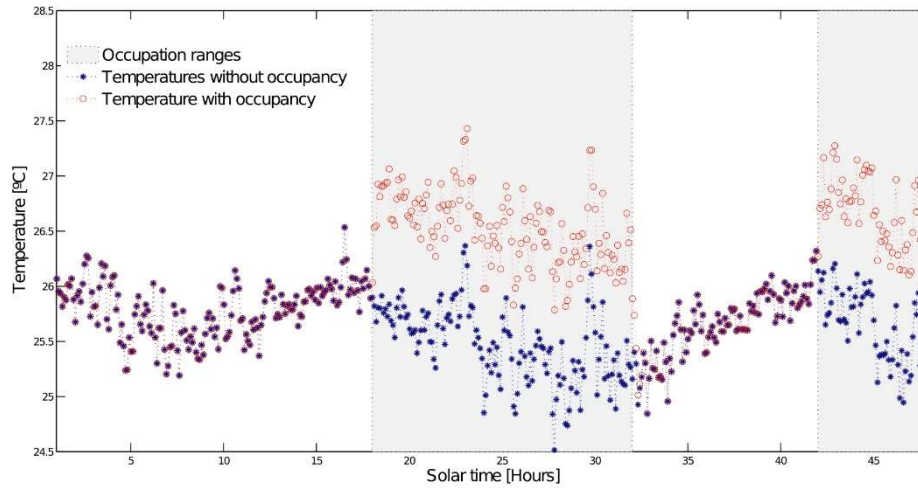
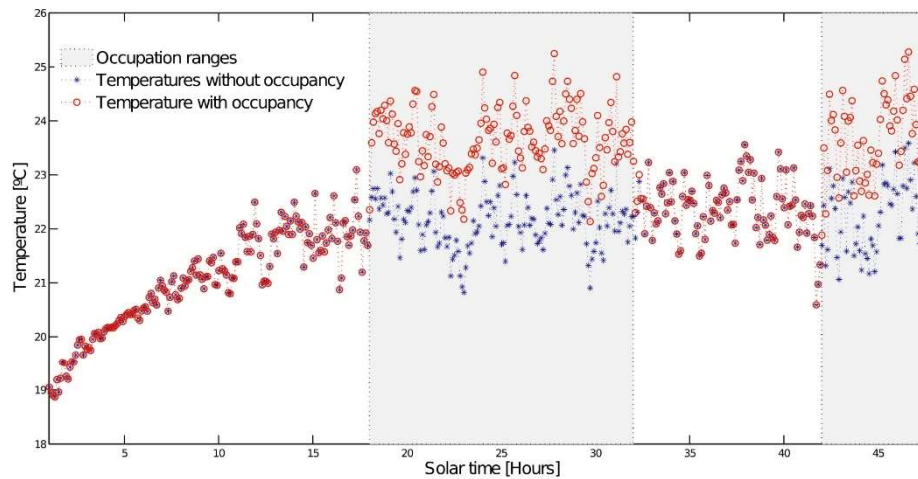


Fig. 11. Simulation at the middle of the pane height for August 15, after 25 h, (with *respiration exacte* temperature at 25 °C and *mur neutalisant* temperature at 15 °C).



(a) August 15.



(b) December 30.

Fig. 12. Comparison of the temperature in the room with and without occupancy load.

high to provide reasonable temperature to the interior to achieve comfort conditions.

In contrast, this heat gain increases to 79.2% for the winter sample (Fig. 8(a)) where the maximum heat transfer to the interior is required. For the day studied, the maximum solar radiation received is 535 W/m^2 also around midday. The most positive point of this case is that even after 15:00 h the heat gain remains quite high demonstrating the advantages of the *mur neutralisant* system.

- Evolution of the temperature of the internal glass

Fig. 9 shows the evolution over time of the temperature of the internal glass together with the exterior temperature.

For the winter case (Fig. 9(a)), the temperature of the interior glass achieved remains almost constant, at approximately 20.7°C . With a small increase of temperature, following the increase of the external temperature, it goes up to 21.2°C . The strong increase in the first 12 h approximately is due to the initial condition. After this time, the temperature is established and there is no influence from the initial data.

In summer (Fig. 9(b)), the behaviour of the *mur neutralisant* manages to reduce the temperature in the interior glass in a range of $21.7\text{--}25.7^\circ\text{C}$ once established. Observe that the temperature of the internal glass buffers the exterior temperature in the hottest hours, achieving a difference of 4°C less.

3.2.3. Coupled 1D/2D model results

In this section we show the results of the coupled model, taking into account: solar radiation, external temperature, temperature of the impulsed air in the *mur neutralisant* and the temperature of the impulsed air in the room. We analyse the results obtained for the temperature inside the *mur neutralisant* and the temperature in the room. We have studied two scenarios, with or without occupancy defined by Eq. (11) in the room. In the case considered, the schedule of occupancy was fixed between 18:00 h and 8:00 h each day.

To be brief, we do not show the graphics corresponding to the 1D results here because the behaviour of the *mur neutralisant* has already been shown.

• Evolution of temperature in the room

Before analysing the results for the interior temperatures of the room it is important to note two specific aspects relating to the general behaviour of the area occupied:

- In the southwest corner, the accumulation of air that is less cold than in the rest of the room in winter and less hot in summer provides a suitable temperature in the area that is farthest away from the air impulse, also encouraging air convection to the area with greatest occupancy.
- In contrast, in the northeast corner in winter there are colder air currents, while in the summer the currents are hotter. Although this is considered one of the least favourable areas in the room, this is not entirely relevant as this corner is actually a small room.

Figs. 10 and 11 show the isovalues of the temperature obtained for the representative hour 25 (at the middle of the first occupation range) for both cases in winter and summer. We comment on these below:

Winter after 25 h (Fig. 10):

In this case the temperature of the active chamber is maintained constant at 30 °C and the *respiration exacte* impulse temperature occurs at 20 °C. Thus, the temperature of the room with occupancy increases by 3.5 °C with respect to the air impulse by *respiration exacte*, while in the case without occupancy the increase is 2 °C. We can see how the increase in temperature when occupied occurs in an almost regular way throughout the room, always with higher temperatures near the *mur neutralisant* than in the rest of the room.

Summer after 25 h (Fig. 11):

When the active chamber temperature is maintained constant at 15 °C and the *respiration exacte* occurs at 25 °C in neutral air conditions, the temperature in the room for the occupancy case increases by only 1.5 °C with respect to the temperature supplied by *respiration exacte*. While if there is no occupancy, the temperature undergoes a steady increase of 0.5 °C. We observe the same behaviour as in the winter case, the temperature increases uniformly in the room when it is occupied.

To show the results more clearly we have measured the temperature obtained by the simulation in several points located in the room, marked in Fig. 7. We then averaged these values to obtain an averaged temperature inside the room for each time. The results are shown for the 48 h of simulation in Fig. 12 and for clarity, we have marked the ranges of hours when occupancy is considered. The temperature is more stable if the occupancy load is not taken into account. For winter and summer cases, the temperatures remain similar even after the first occupancy range, and a clear increase in temperature is observed during the occupancy hours.

4. Conclusions

The FreeFem++ simulations and their subsequent analysis support Le Corbusier's proposal to combine the *mur neutralisant* and *respiration exacte* for the environmental conditioning of the City of Refuge, G. Lyon's calculations for both systems and the main conclusions reached by J. Le Braz in the St. Gobain tests. This shows the importance of this proposal, more than 50 years ahead of its time in relation to modern active façade systems, of which Le Corbusier's project is the clearest precursor.

In the results we observe uniform room temperature and suitable climate conditions for both winter and summer cases. There is an exception at the Northeast corner and mainly at the Southwest corner due to the irregular geometry of the room. The thermal activity in the *mur neutralisant* balances the external temperature to produce a milder temperature of the internal glass and in turn, approach climate comfort conditions within the room.

In winter for an air flow supply (*respiration exacte*) of 20 °C and a chamber temperature of 30 °C (heating), the superficial temperature of the internal glass is uniform with slight variations between 20.7 °C and 21.2 °C. The temperature in the room for the representative solar hour 25 (at the middle of the first occupation range) and an exterior temperature of -4 °C is homogeneous with average values of 23.5 °C if occupied and of 22 °C if not.

Similarly for the summer case, for an air flow supply (*respiration exacte*) of 25 °C (neutral primary air) and an air flow supply of 15 °C (into the active chamber), climate comfort is maintained. The highest exterior thermal oscillation leads to a range of internal glass temperature between 21.7 °C and 25.7 °C. In addition, the temperature of the room for the solar hour 25 – the most unfavourable case because of night occupancy – is 25.5 °C with the room empty and presents a small increase to 26.5 °C when occupied.

The innovative technologies developed by Le Corbusier based on the *mur neutralisant* and the *respiration exacte*, provide a new conditioning system through the building envelope ahead of the first air conditioning systems then appearing in the United States. Unlike these, Le Corbusier proposed to provide the façade with heating and air-conditioning of the interior spaces and a ventilation mechanism through the *respiration exacte*. He was clearly the precursor of the later active system façades.

Thus, comfort conditions and thermal uniformity are achieved by simply heating or cooling the air volume inside the *mur neutralisant*, by at most 10 °C – for the most unfavourable conditions – in relation to the desired temperature into the room. In theory this system seems more economical than the use of a standard air conditioning machine to heat or cool the total mass of air in the room.

However, to really value the efficiency of the system developed by Le Corbusier, a more extensive study should be carried out, especially focusing on the comparison with alternative conditioning systems. Given that no cooling system was included in the building and the traditional heating system had to be installed, these kinds of comparisons entail major difficulty as there is no data for comparison.

Acknowledgements

The authors wish to thank the Fondation Le Corbusier and the Saint Gobain company for the information provided. The work of E.D. Fernández-Nieto and G. Narbona-Reina was partially supported by Spanish Government Research project MTM2012-38383-C02-02.

Table A.1

Monthly average of the most representative parameters of energy plus weather (EPW) file of Paris.

Month	Dry-bulb temp. (°C)	Relative humidity (%)	Infrared horiz. rad. (Wh/m ²)	Normal rad. (Wh/m ²)	Sky rad. (Wh/m ²)	Global horiz. rad. (Wh/m ²)	Direct normal rad. (Wh/m ²)	Diffuse horiz. rad. (Wh/m ²)
January	3.87	91.4	115.31	1415.06	286.93	32.37	31.25	22.84
February	4.15	68.1	178.67	1404.02	283.67	58.08	49.52	38.29
March	7.00	75.5	272.13	1383.50	298.59	95.21	46.03	71.35
April	9.98	72.8	374.35	1358.62	308.70	151.45	72.35	104.07
May	14.33	66.4	447.44	1338.44	330.57	192.22	89.41	130.72
June	16.83	77.8	482.3	1325.71	349.51	221.60	123.60	133.98
July	19.44	65.3	465.57	1324.33	357.76	223.44	140.79	125.68
August	19.69	68.1	402.79	1334.50	358.15	202.94	154.68	103.73
September	15.76	77.8	311.96	1353.81	341.69	130.05	84.78	84.06
October	11.36	81.4	213.75	1377.76	316.40	84.73	74.24	51.10
November	6.48	89.3	134.68	1399.88	299.06	43.47	43.90	29.07
December	4.51	89.7	98.22	1414.06	290.27	25.33	18.43	20.34

Appendix A. Initial conditions

For the calculation with FreeFem++ an energy model generated and assessed with DesignBuilder was produced in order to execute a simulation of the environmental conditions of the room studied. This was done following the room's real construction, with a single glazed façade, as the *mur neutralisant* could not finally be built with double glazing. In turn this made it possible to apply both Le Corbusier's proposed innovations to real conditions. The DesignBuilder simulation followed two different procedures allowed by the program. The first obtains a global assessment of the environmental conditions in the room using EnergyPlus [20], while a second more advanced procedure provides an assessment of these environmental conditions at each point in the room using CFD algorithms. We collect in Table A.1 the climatic conditions for the city of Paris including the main data of the climate file considered for the calculation.

The specific calculation conditions for both procedures are as follows:

Specific conditions for the EnergyPlus calculation• **Solar protection**

The type of solar protection used consists of a system with 10 mm thick vertical PVC slats with a conductivity equal to 0.16 W/mK. The type of shade has been placed 70 mm back from the façade.

It should be noted that this study was carried out from a thermal perspective, and therefore, aspects characteristic of natural daylight were not taken into account when programming the solar protection system.

• **Adjacencies**

The spaces adjacent to the room studied were taken into account in the construction of the model. Spaces with the same operative and use conditions as the room under study have been defined as adiabatic. However, uninhabitable spaces and common areas have been considered to be zero occupancy areas. Fig. 13 shows the model with the room under study highlighted in red.

• **Infiltrations**

Different infiltration values were introduced into the model depending on the intended use of each of the spaces. Table 4 shows the infiltration flows considered in each of the areas of the floor studied.

As can be observed, infiltrations were not considered in the room under study as the mechanical ventilation system (*respiration exacte*) maintains it at a high pressure in relation to the exterior. Therefore, the amount of uncontrolled air introduced through the glazed façade is considered negligible.

• **Ventilation systems**

In large rooms this system allowed 1 ACH in winter and 2–3.5 ACH in summer. Therefore air flow impulse was set at 300 m³/h and 1050 m³/h for winter and summer respectively.

It was observed that a 525 mm × 225 mm mesh has an actual surface of 0.118 m² and an effective surface of 0.101 m², so with these summer and winter impulse flows the following passage speeds would result:

$$\begin{cases} v_{winter} = \frac{300 \text{ m}^3/\text{h}}{(0.098 \text{ m}^2 \cdot 0.85)} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1 \text{ m/s} \\ v_{summer} = \frac{1050 \text{ m}^3/\text{h}}{(0.098 \text{ m}^2 \cdot 0.85)} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 3.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (13)$$

Specific conditions for the calculations of CFD• **Flow equilibrium**

The model's incoming and outgoing flows must be balanced in order to ensure the mass balance in simulations using CFD. Admittance flows are introduced through the impulse mesh: 291.66 l/s in summer and 83.33 l/s in winter. Extraction flows take place through a small opening below the entry door to the room under study.

• **Temperatures**

Temperature data was obtained from the simulation results with EnergyPlus in DesignBuilder. Table 5 reflects the radiant temperatures imported into the CFD calculation model for each type of enclosure, (see numbering in Fig. 14), for every day and hour simulated.

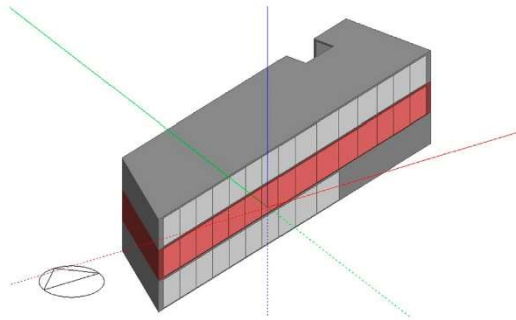
**Fig. 13.** Adjacencies considered in the model of the room under study.

Table 4
Types of infiltration.

Spaces	Surface of floor (m ²)	Surface exposed to outside		Infiltrations renovations/h
		Opaque (m ²)	Glazed (m ²)	
Study room	297.67	136.20	118.50	0
Attached room	7.12	14.76	3.00	0.2
Common area	48.63	17.39	6.95	3
Toilets	23.05	14.24	6.00	1
Lifts	4.75	0	0	1

Table 5
Radiant temperature of each type of wall according to numbering.

Type of wall	Surface (m ²)	Radiant temperatures (°C)			
		December 30		August 15	
1 South wall façade	11.77	16.00	16.37	27.33	28.97
1 South glass façade	118.50	13.97	13.65	42.72	22.55
2 North wall	80.50	21.12	17.50	28.63	27.14
3 West wall	43.45	21.00	17.53	28.59	27.57
4 Interior partition insulated a	38.50	21.19	17.54	27.65	27.20
5 Interior partition insulated b	13.50	18.99	17.10	27.71	27.18
6 Interior partition not insulated	6.60	18.79	15.30	30.19	27.44
6 Door	297.67	4.16	1.58	29.97	25.86
7 Ceiling	297.67	22.21	20.50	27.64	27.06
8 Floor	297.67	25.37	21.55	27.13	26.81

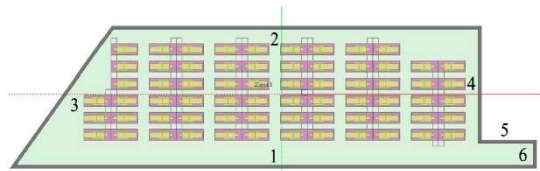


Fig. 14. Numbering of individual energy model enclosures for the purposes of correspondence with radiant temperatures.

• **Meshing**

The CFD internal analysis field was established based on the generation of a mesh defined using two factors: the pre-determined spacing of the mesh (0.1 m) and the tolerance in the overlapping of mesh lines (0.01 m). It is important to establish different densities, since certain areas in the room under study require more precision than others, as is the case of the entry partition with the impulse grid into the room and the door opening for extraction, making finer meshing advisable in this area.

• **Convergence**

The calculations carried out were simulated following the $K-\epsilon$ “Standard”, one of the most widely used turbulence models, using transport equations with turbulent flow properties: convection and diffusion of turbulent energy. K represents the turbulent

kinetic energy transported while ϵ is the turbulent dissipation transported.

A maximum number of iterations and acceptable residual values for mass, velocity, temperature and turbulence were established. Once these requirements were met the results obtained could be considered valid. In the computations developed here, we established a maximum of 10,000 iterations and a residual value of $10e-6$ to ensure the convergence. We show in Fig. 15 the convergence graphic displayed by DesignBuilder where the normalized residuals are represented in front of the number of iterations.

Appendix B. Nomenclature

ρ	density of glass (kg/m ³)
c	specific heat (J/(kg K) = (W s)/(kg K))
V	area (m ²)
η	mass flow in the channel per unit depth (kg/s m)
σ	Stephan–Boltzman constant 5.57×10^{-8}
ϵ_{eg}	emissivity of external glass
ϵ_{ig}	emissivity of internal glass
α_{eg}	absorbency of external glass
α_{ig}	absorbency of internal glass
τ_{eg}	energy transmission of external glass
τ_{ig}	energy transmission of internal glass

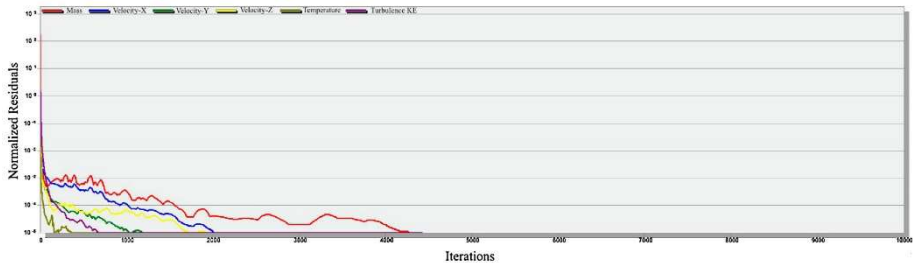


Fig. 15. Normalized residual values versus iterations.

Q_{ig}	net radiant heat transfer in the internal glass
Q_{eg}	net radiant heat transfer in the external glass
U	transmittance coefficient ($W/(m^2 K)$)
U_{ext}	transmittance coefficient of external glass ($W/(m^2 K)$) $U_{ext} = \frac{1}{R_{se} + R_{eg} + R_{si}}$
U_{int}	transmittance coefficient of internal glass ($W/(m^2 K)$) $U_{int} = \frac{1}{R_{se} + R_{ig} + R_{si}}$
R_{se}	film exterior coefficient ($(m^2 K)/W$)
R_c	thermal resistance of channel ($(m^2 K)/W$)
R_{si}	film interior coefficient ($(m^2 K)/W$)
R_{eg}	thermal resistance of external glass ($(m^2 K)/W$) $R_{eg} = \frac{e_{eg}}{\lambda_{eg}}$
R_{ig}	thermal resistance of internal glass ($(m^2 K)/W$) $R_{ig} = \frac{e_{ig}}{\lambda_{ig}}$
e_{eg}	depth of external glass (m)
e_{ig}	depth of internal glass (m)
λ_{eg}	thermal conductivity of external glass ($W/(m K)$)
λ_{ig}	thermal conductivity of internal glass ($W/(m K)$)

References

- [1] E. Gallo, V. Fernandez, A factory for well-being, innovation in the heating system and the curtain-wall in Le Corbusier's Salvation Army City of Refuge, Paris 1933, CDHTE-CNAM, Ecole Nationale d'Architecture, Toulouse, 2010.
- [2] B. Taylor, Technology, society, and social control in Le Corbusier's Cité de Refuge, Paris 1933, *Oppositions* 16 (1979) 168–185.
- [3] Fondation of Le Corbusier. Available from: <http://www.fondationlecorbusier.fr> (07.01.12).
- [4] W. Boesiger, Le Corbusier et Pierre Jeanneret: oeuvre complete, vol. 2, 1929–1934, Birkhauser, Basel, Switzerland, 1999.
- [5] R.L. La maison de verre de MM. Le Corbusier et Jeanneret et le mur neutralisant, *Glaces et Verres* 20 (1933) 10–12.
- [6] J. Le Braz, in: La transmission de la chaleur grâce à travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations, *Glaces et Verres* 20 (1933) 12–18.
- [7] DesignBuilder v.2.4.2.026, Available from: <http://www.designbuilder.es/descargas/software-designbuilder> (17.06.13).
- [8] FreeFem++ v.-3.20. Available from: <http://www.FreeFem.org/ff++/> (30.10.11).
- [9] J. Joe, W. Choi, Y. Kwak, J.-H. Huh, in: Optimal design of a multi-story double skin façade, *Energy and Buildings* 76 (2014) 143–150.
- [10] M. Ghadimi, H. Ghadami, A.A. Hamidi, M. Shakouri, S. Ghahremanian, in: Numerical analysis and parametric study of the thermal behavior in multiple-skin façades, *Energy and Buildings* 67 (2013) 44–55.
- [11] M.A. Shameri, K. Alghoul, M. Sopian, M. Fauzi, Sain, O. Elayeb, in: Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1468–1475.
- [12] J. Zhou, Y. Chen, in: A review on applying ventilated double-skin façade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 1321–1328.
- [13] Y.H. Chen, Sz. Sa, Ys. Zhou, S.X. Wei, Z.H. Tan, in: A mathematical model of thermal channel glazing curtain wall, *Building Energy & Environment* 25 (2006) 10–15.
- [14] D. Brandl, T. Mach, M. Grobbauer, C. Hochenauer, in: Analysis of ventilation effects and the thermal behaviour of multifunctional façade elements with 3D CFD models, *Energy and Buildings* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.036>.
- [15] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, in: Modeling and simulation of a simple glass window, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 80 (2003) 355–374.
- [16] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, in: Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005) 461–475.
- [17] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, in: Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 295–302.
- [18] M. Liu, K. Bjarne Wittchen, P. Kvols Heiselberg, F. Vildbrad Winther, in: Development and sensitivity study of a simplified and dynamic method for double glazing facade and verified by a full-scale façade element, *Energy and Buildings* 68 (2014) 432–443.
- [19] Saint Gobain. Available from: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/SP/index.asp?nav1=AU&nav2=AUSM/> [13.09.12].
- [20] EnergyPlus v.6.0. U.S. Department of Energy (DOE). Available from: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus.training.cfm> [02.09.13].

8.3. Discusión de resultados

En esta tercera publicación, los modelos energéticos generados tienen en cuenta las condiciones climáticas parisinas, los perfiles de uso y las condiciones operacionales de funcionamiento, así como las características espaciales y materiales de la envolvente de la Ciudad del Refugio. Esto nos ha permitido no solo cuantificar los principales parámetros del ambiente térmico de la habitación objeto de estudio, sino también hacer representaciones gráficas de la evolución del clima interior ante variaciones del clima exterior: diferencias de temperatura, caudales de aire, radiación térmica, etc. En definitiva, las simulaciones con los códigos empleados en FreeFem++ permiten anticipar, con fiabilidad, el comportamiento térmico del caso de estudio.

8.3.1. Simulación del muro neutralizante (problema 1D)

El primer modelo evalúa el comportamiento térmico del muro neutralizante en función de la temperatura exterior, la radiación solar y la temperatura del aire impulsado en la cámara de aire intermedia entre las dos hojas de vidrio. Todos los valores de emisividad, absorptancia, transmisión, densidad, calor específico y resistividad térmica de los vidrios han sido tomados de los datos ofrecidos por Saint Gobain (Tabla 3).

Propiedades	Vidrio exterior	Cámara de aire	Vidrio interior
Espesor (m)	$e_{eg} = 0.007$	$e_c = 0.10$	$e_{ig} = 0.007$
Emisividad	$\xi_{eg} = 0.07$		$\xi_{ig} = 0.07$
Absortancia	$\alpha_{eg} = 0.14$		$\alpha_{ig} = 0.14$
Transmisión	$\tau_{eg} = 0.79$		$\tau_{ig} = 0.79$
Densidad (kg/m ³)	$\rho_{eg} = 2500$	$\rho_{eg} = 1293$	$\rho_{ig} = 2500$
Calor específico (kJ/K)	$c_{eg} = 750$	$c_{eg} = 1004$	$c_{ig} = 750$
Resistencia térmica (m K/W)	$R_{eg} = 0.17545$	$R_{eg} = 0.125$	$R_{ig} = 0.17545$

Tabla 3. Propiedades de los vidrios.

Como resultado de aplicar el modelo numérico propuesto para la evaluación térmica del muro neutralizante (problema 1D), en la figura 64 se refleja la evolución de las ganancias de calor en ese muro debidas a la radiación solar, tanto en un día representativo de invierno (30 de diciembre) como de verano (15 de agosto), y su relación con esa intensidad de radiación. En el caso del día de verano (Fig. 64(b)), la ganancia máxima se produce a las 12:00 h cuando hay 2.200 W/m² de intensidad máxima de radiación solar incidente; sin embargo, la transferencia de calor hacia el interior no es lo suficientemente alta como para impedir las condiciones de confort. Aunque en invierno la intensidad máxima de radiación solar incidente se reduce a 535 W/m², también sobre las 12:00 h, es lo suficientemente alta como para producir una importante ganancia de calor, incluso después de las 15:00 h, demostrando así las ventajas del sistema. (Fig. 64(a)).

8. Modelo numérico simplificado del efecto combinado del muro neutralizante y respiración exacta

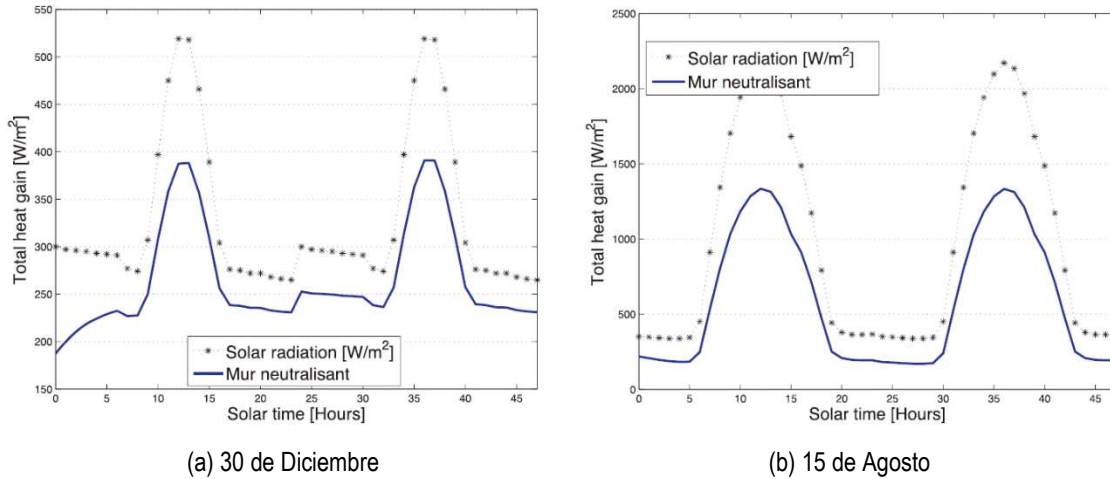


Figura 64. Ganancia total de calor en el muro neutralizante durante dos días de estudio.

Como consecuencia de lo anterior, en la figura 65 se muestra la evolución en el tiempo de la temperatura del vidrio interior en relación con la temperatura exterior. Para el día representativo de invierno (Fig. 65 (a)), la temperatura del vidrio interior logra permanecer casi constante, aproximadamente sobre los 20.7 °C. En el día seleccionado de verano (Fig. 65(b)), el comportamiento del muro neutralizante consigue reducir la temperatura del vidrio interior en un rango entre 21.7 °C – 25.7 °C, amortiguando unos 4 °C la temperatura exterior en las horas más cálidas.

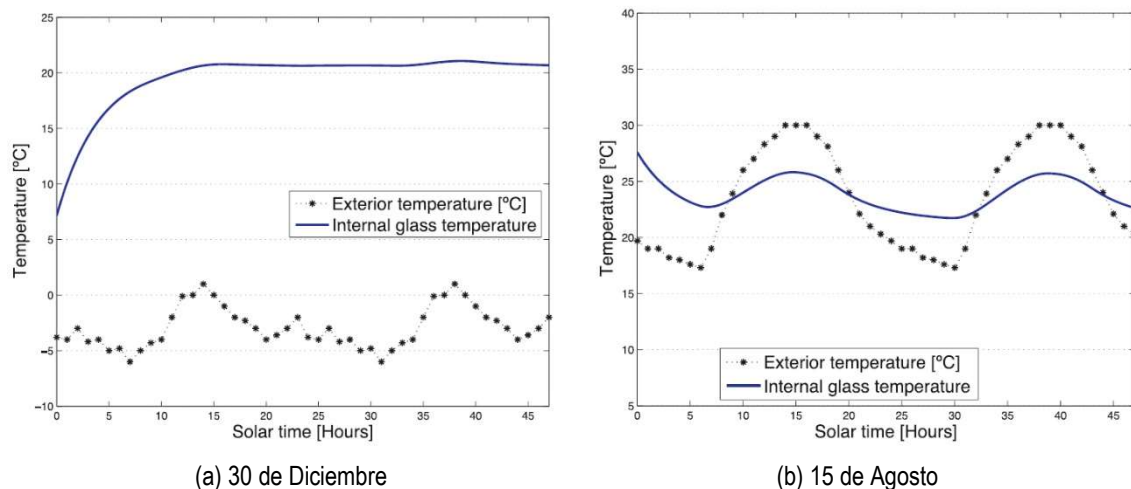


Figura 65. Evolución de la temperatura del vidrio interior durante dos días de estudio.

8.3.2. Simulación de la respiración exacta (problema 2D)

La simulación del modelo permite obtener la evolución de la temperatura interior de la habitación cuando en ella se introduce un caudal de ventilación (respiración exacta). Para resolver este problema de mecánica de fluidos se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes, junto con una ecuación de convección-difusión para el problema termodinámico.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Se han realizado las simulaciones de las temperaturas interiores con dos escenarios: con y sin ocupantes. Dado el uso fundamental como dormitorio, se fijó como calendario de ocupación entre las 18:00 h y las 8:00 h, todos los días de la semana. Para las cargas de los ocupantes, se ha considerado una ratio de 1 pers./4 m² con una carga total por ocupante de 46 W, acorde a su grado de actividad.

8.3.3. Simulación del modelo acoplado 1D/2D

Mediante un código acoplado se combina la acción de los modelos numéricos para evaluar el comportamiento térmico de la habitación objeto de estudio con el muro neutralizante y la respiración exacta tal y como fueron proyectados por Le Corbusier.

En la figura 66, para el día seleccionado de invierno, y en la figura 67, para el elegido de verano, se presentan los resultados de la distribución de la temperatura interior en una sección horizontal situada a mitad de la altura de la habitación, una vez estabilizadas las condiciones de funcionamiento del sistema térmico (25 horas después del inicio de la simulación). En ambas estaciones se presentan los resultados con y sin ocupación.

En invierno (Fig. 66), impulsando 100 l/s de aire caliente por cada metro lineal de muro a una temperatura constante de 30 °C (+10 °C respecto la temperatura interior de confort), e impulsando 300 m³/h de aire de la respiración exacta en la habitación a 20 °C, la temperatura media en el interior de ésta se eleva a 23.5 °C, por tanto, 3.5 °C superior a la temperatura del aire impulsado por la respiración exacta, mientras que en el caso sin ocupación ese incremento es lógicamente inferior: de 2 °C, en ambos casos, con temperaturas más altas cerca del muro neutralizante que en el resto de la habitación.

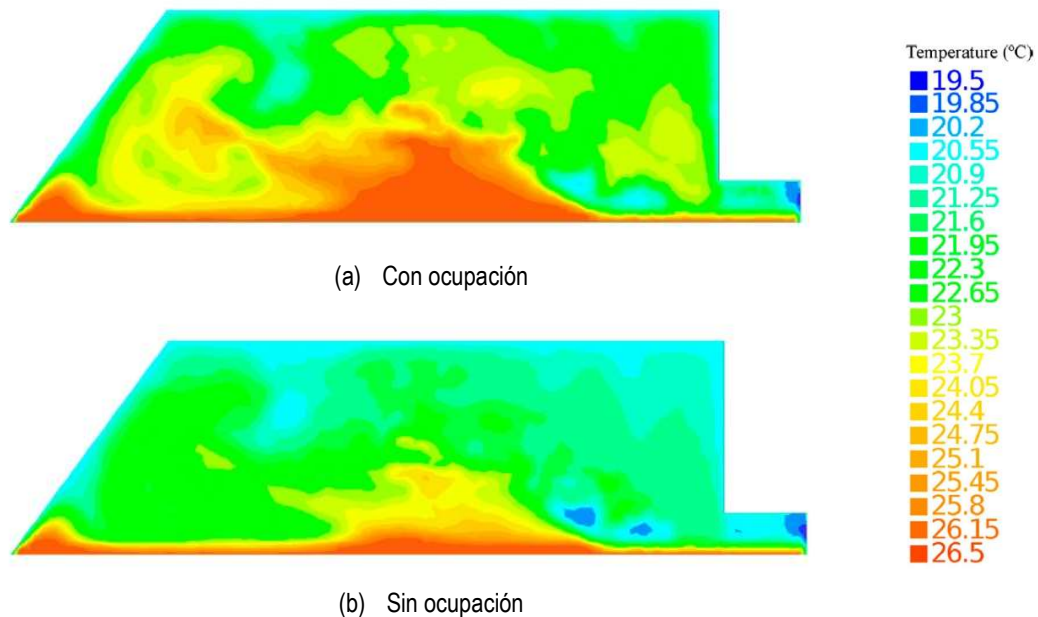


Figura 66. Simulación a la altura media del muro neutralizante el 30 de diciembre después de las 25 horas (con temperatura de la respiración exacta a 20 °C y temperatura del muro neutralizante a 30 °C).

En verano (Fig. 67), impulsando 100 l/s de aire frío por cada metro lineal de muro a una temperatura constante de 15 °C (-10 °C respecto de la temperatura interior de confort), e impulsando 1050 m³/h de aire de la respiración exacta en la habitación a 25 °C, la temperatura media de la habitación cuando está ocupada solo se incrementa 1.5 °C respecto a la temperatura de impulsión de la respiración exacta, mientras que, sin cargas de ocupación, ese aumento se reduce 0.5 °C. A diferencia de invierno, las mayores temperaturas se producen al fondo de la habitación, especialmente con ocupación.

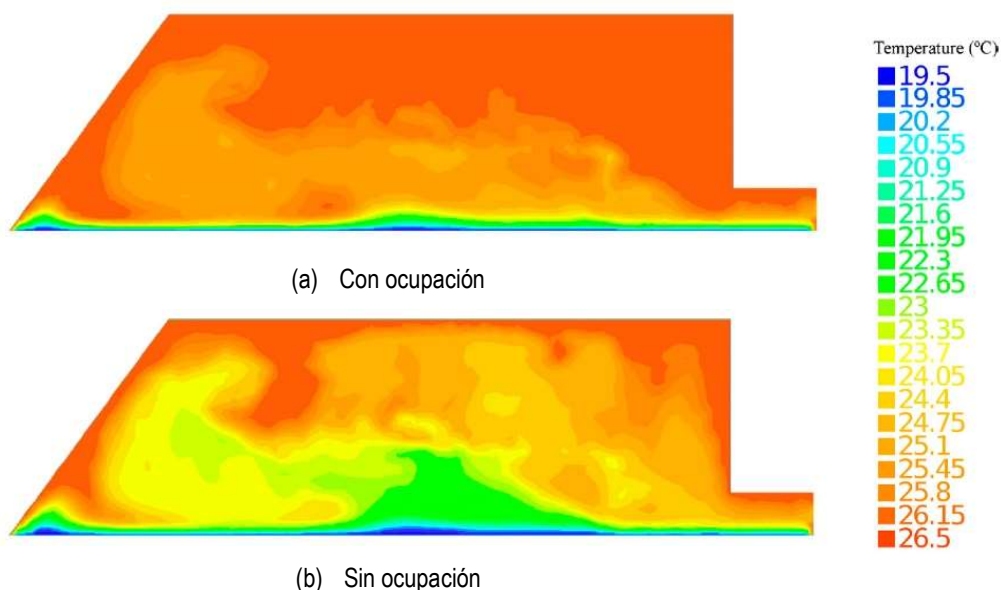


Figura 67. Simulación a la altura media del muro neutralizante el 15 de Agosto después de las 25 horas (con temperatura de la respiración exacta a 25 °C y temperatura del muro neutralizante a 15 °C).

Para mostrar los resultados de la simulación con un mayor grado de detalle, en la figura 68 se ha presentado la evolución de las temperaturas en una malla de puntos interiores de la habitación (Fig. 69), sin ocupación y con ocupación según el calendario indicado. Como puede observarse, la temperatura es más estable si la carga de ocupación no se tiene en cuenta.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

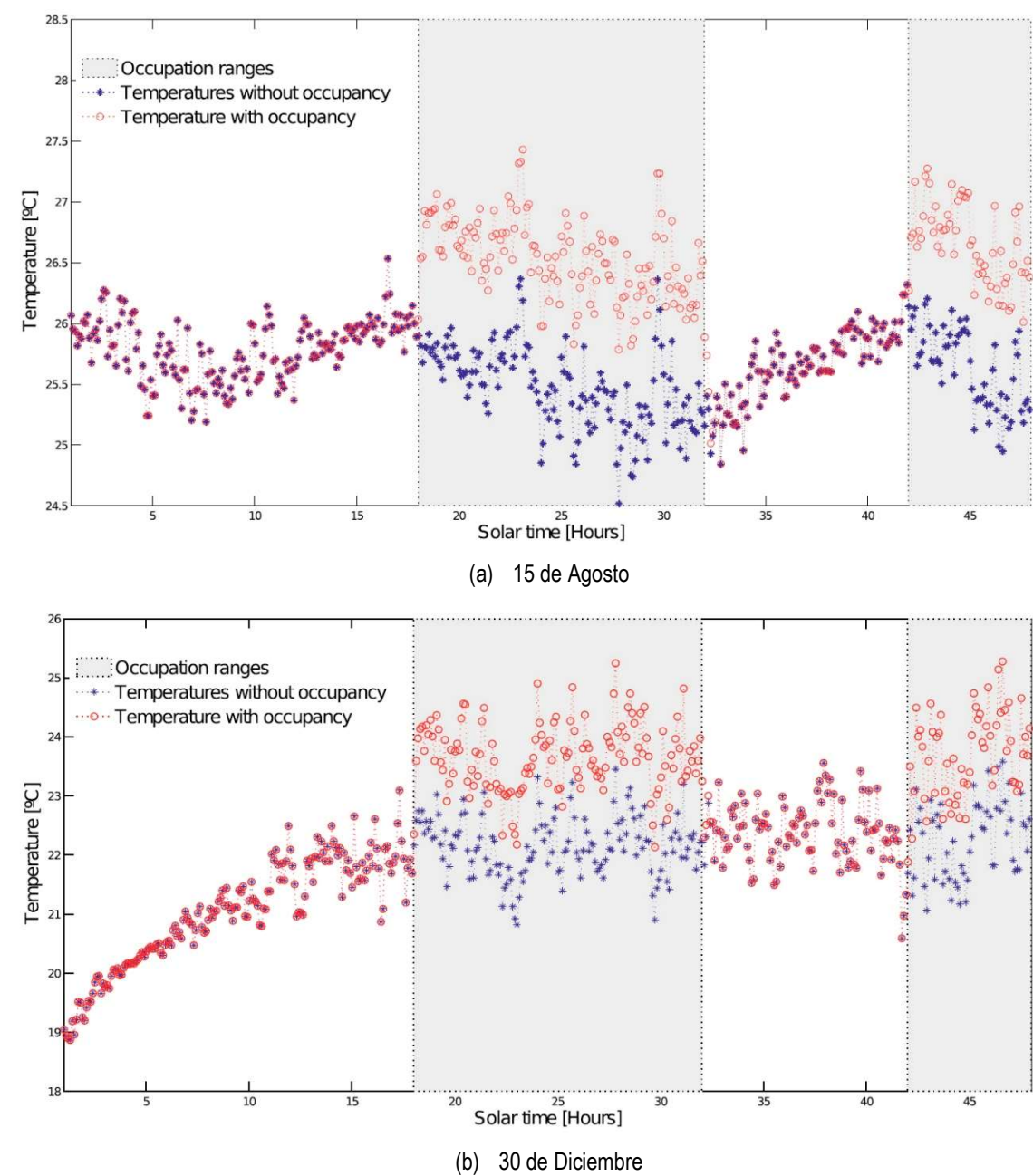


Figura 68. Comparación de la temperatura interior de la habitación con y sin cargas de ocupación.

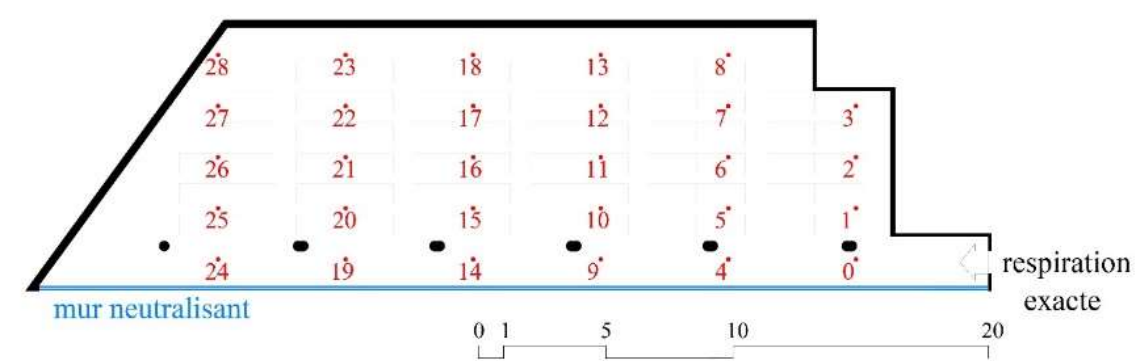


Figura 69. Puntos de medida de la temperatura interior (*) marcados en rojo.

9. Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada activa transparente de doble piel y un sistema de ventilación mecánica

Nombre y adscripción de autor y coautores.

Thermal 3D CFD Simulation with Active Transparent Façade in Building.

Cristina Ramírez Balas, Enrique D. Fernández Nieto, Gladys Narbona-Reina, Juan José Sendra Salas, Rafael Suárez Medina.

Referencia completa de la revista o editorial de publicación.

Energies 2018, 11 (9), 2265. <https://doi.org/10.3390/en11092265>. Indexada en JCR (Q3)

9.1. Resumen

La cuarta publicación es un artículo que tiene dos objetivos principales. El primero sería elaborar un modelo predictivo más desarrollado que el anterior para la evaluación del comportamiento térmico del caso de estudio y que podría aplicarse no solo a la combinación del muro neutralizante y de la respiración exacta, tal y como fueron proyectados por Le Corbusier, sino también al efecto conjunto de una Fachada Activa Transparente (ATF) de doble piel y de un sistema de ventilación mecánica. La complejidad del modelo radica, sobre todo, en considerar la distribución de temperaturas del dormitorio principal de la Ciudad del Refugio como un problema tridimensional (3D), manteniéndose el planteamiento del muro neutralizante como un problema unidimensional (1D).

Además, este modelo numérico no se limita a establecer como parámetros de diseño los fijados en su día por Le Corbusier y Lyon tras los ensayos realizados por los ingenieros de Saint Gobain, sino que se podría aplicar para cualquier fachada catalogada como Active Transparent Façade (ATF), y se podrían modificar las condiciones tanto de impulsión del aire en la cámara intermedia como las de impulsión del aire de ventilación en la habitación objeto de estudio, así como la posición y tamaños de las rejillas de ventilación, todo ello con el fin de producir un mayor ajuste de las condiciones de confort en la habitación y de aumentar la eficiencia energética del sistema térmico. Por tanto, usando este modelo predictivo más complejo se podría llegar a optimizar los parámetros de diseño del sistema térmico y ofrecer alternativas a los propuestos por Le Corbusier y Lyon, segundo de los objetivos principales de esta cuarta publicación.

Como métodos de investigación, se han seguido utilizando los principios y formulaciones de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y las ecuaciones de Navier-Stokes, así como el método de elementos finitos (FEM), habiendo desarrollado la programación en código abierto mediante el software FreeFEM3D. Una mejora sustancial del método utilizado en la tercera publicación ha consistido en la generación de un

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

modelo 3D que incluye los pilares circulares existentes a, aproximadamente, 1.32 m de la fachada acristalada, que afectan notablemente a la circulación del aire en el interior de la habitación.

9.2. Publicación



Article

Thermal 3D CFD Simulation with Active Transparent Façade in Buildings

Cristina Ramírez-Balas ¹, Enrique Fernández-Nieto ², Gladys Narbona-Reina ² ,
Juan José Sendra ¹ and Rafael Suárez ^{1,*}

¹ Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, Spain; crisramirezbalas@gmail.com (C.R.-B.); jsendra@us.es (J.J.S.)

² Departamento de Matemática Aplicada I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, Spain; edofer@us.es (E.F.-N.); gnarbona@us.es (G.N.-R.)

* Correspondence: rsuarez@us.es; Tel.: +34-954-559-517

Received: 12 July 2018; Accepted: 20 August 2018; Published: 28 August 2018



Abstract: In recent years active façades have acquired greater importance given their capacity to improve the energy efficiency of buildings. One such type is the so-called Active Transparent Façade (ATF). A 3D numerical model based on computational fluid dynamics (CFD) and the Finite Element Method (FEM) has been generated to simulate the thermal performance of buildings equipped with this type of façade. This model is introduced for general application and allows the design parameters to be adapted for this system. The case study of Le Corbusier's proposal for the City of Refuge in Paris, the clearest example of previous use of an ATF is examined. In addition, a proposal is presented for the energy improvement of Le Corbusier's original solution. In order to do so, the conditions for the supply of air into the ATF cavity and in the mechanical ventilation system are assessed to guarantee comfort conditions.

Keywords: 3D numerical modelling; thermal computational fluid dynamics (CFD) simulation; active transparent façade (ATF); double-skin façade (DSF); City of Refuge by Le Corbusier; mur neutralisant

1. Introduction

The use of active façades is one of the main lines of research for increasing energy efficiency in buildings. Their design and operation are essential in ensuring a comfortable indoor climate under different outdoor environmental conditions. The Active Transparent Façade (ATF) is an architecturally relevant type of Double-Skin Façade (DSF) consisting of double glazing panes with a mechanically ventilated air cavity between them.

The use of a DSF constitutes an improvement on Single-Skin Façades, as analysed by Gratia and de Herde [1] in different climates. However, one of the factors to be controlled in these façades is potential overheating in a building due to the increase in air temperature in the cavity resulting from the high temperatures reached on the surface of the outer glass. This can in turn generate an increase in cooling loads. There is also a need to control surface condensation, especially at night in humid tropical climates, as it leads to the use of mechanical fans with the subsequent increase in electric consumption [2].

The corrective measures to prevent overheating problems in DSFs has been studied by various authors. Gratia and André [3] propose solutions using solar protection, assessing the efficient position of shading devices, given that the location of the blinds, the colour of the blinds and the opening of the double skin are the most important factors. Barbosa and Ip [4] analyse the use of DSFs in buildings with natural ventilation by assessing the influence of the façade and building as well as the

site parameters: the features of the cavity and the external layer of the façade, the configurations of the building and the effects of outdoor environmental conditions. The efficiency of the ventilation in the air cavity as dynamic insulation with respect to solar radiation was studied by Hazem et al. [5]. Based on thermal measurements, Larsen et al. [6] proposed corrective measures in Mediterranean climates according to orientation and selecting the most suitable types of glazing and ventilation of the interior cavity in order to reduce overheating. Gelesz and Reith [7] also analysed the behaviour of these façades in central European buildings based on orientation. According to this study the need to heat a fully glazed cell is minimal and by applying the ventilation and shading system to the cavity the cooling loads can be reduced by 7% and 9–12% on average compared to a façade with double or triple glazing, respectively.

Graf and Marino [8] propose energy conservation and reduction strategies that are suited to comfort and thermo-acoustic performance. Presenting a different approach, Zuazua-Ros et al. [9] apply animal biomorphic models as a system for building energy management, taking into account morphology and modifying spaces for use.

Ibañez-Puy et al. [10] analysed the energy efficiency of a building with the addition of a Ventilated Active Thermoelectric Envelope (VATE). The modular façade prototype features a Ventilated Active Façade (VAF) as a passive design strategy for the optimised performance of the Opaque Ventilated Façade (OVF), while the active technology used to improve sustainability is made up of renewable energy devices with Thermoelectric Cooling and Heating Unit (TCHUs) which act as heat pumps.

Le Corbusier's *mur neutralisant* [11–13] is the best-known antecedent of an ATF. His innovative proposal, formulated a century earlier but never executed, included a ventilation system in its interior air cavity and thermal control of initial airflow. In addition, in his design for the City of Refuge in Paris [14–16], Le Corbusier combined the use of the *mur neutralisant* with a mechanical ventilation system to control the indoor air quality in the dormitories - a system which he named *respiration exacte*, using a biological simile [17].

Although some experiments predict the behaviour of a DSF using Computational Fluid Dynamics (CFD) [18], to date very few studies analyse the joint effect of a DSF with a mechanical ventilation system in controlling indoor air quality in buildings. Among these it is worth noting that by Fallahi et al. [19], which develops a numerical model for predicting the thermal profiles of different DSF configurations in order to calculate the cooling/heating loads resulting from an interior area adjoining the façade. Pappas and Zhai [20] used an iterative model with CFD and a Building Energy Simulation Program (BESP) to establish a series of correlations for airflow values for the cavity, stratification of air temperature and interior convection coefficient. Based on these, they carried out an energy analysis of a DSF with buoyancy-driven airflow adjacent to a habitable space at a constant temperature of 20 °C.

A wide range of simulation tools is currently used to assess the energy behaviour of DSFs, including TRNSYS, EnergyPlus, BSim and BESP. Kim and Park [21,22] analysed whether simulation tools are able to provide accurate descriptions of the transient heat and mass transfers occurring within the complex 3D geometry of DSFs. They showed the differences occurring in thermal behaviour and in airflow in the chamber between the measurements of experimental data and the EnergyPlus simulation results. Errors are mainly caused by the degree of uncertainty of input parameters in the simulation, simplifications during the modelling process, or the limitations of the simulation tool. They propose the use of more advanced models with broader access to software, as EnergyPlus does not allow certain parameters to be exported. New expressions are needed for the coefficients for heat transfer through convection, based on air speed within the cavity.

There are interesting studies on the energy behaviour of ATFs in buildings in Mediterranean climate based on CFD [23,24]. The prediction of heat transfer in CFD simulation continues to be a complex task. Peng et al. [25] analysed error factors such as in turbulence models, software used, influence of surrounding conditions, meshing, convergence criteria and simulation strategies. In addition, differences are observed depending on whether the model is generated in 2D or 3D. In most of the literature published, energy models are conditioned by room measurements and the

complexity of their shape, by the model type (1D, 2D or 3D), as well as by the long computation times due to numerical complexity, command of space, the passing of time and simulation periods [26]. As a result of this, Fuliotto et al. [27] proposed a simple computer tool using uncoupling methods to obtain simplified software to assess the operation of these façades using 2D models.

This study aims to develop a 3D mathematical model combining the simultaneous action of an ATF and mechanical ventilation system of the room as a thermal conditioning system. The case study used is a dormitory from the City of Refuge in Paris (1929–1933). In the building of the City of Refuge Le Corbusier incorporated both his proposals for technological innovation—the *mur neutralisant* and *respiration exacte*—as a way to adapt the new glazing architecture of the Modernist Movement to the environmental conditions. Le Corbusier proposed the application of this type of active façade in all environmental conditions. The building as a machine for habitation had to function from Dakar to Moscow [28]. In addition to establishing the effectiveness of the system proposed by Le Corbusier, an energy improvement of the system is proposed by modifying airflow supply temperature into the ATF cavity and the mechanical ventilation system.

Previous work by the authors [29,30] proposed a 1D numerical model of the active façade designed by Le Corbusier for the City of Refuge. In order to assess its thermal effect in the dormitory (case study) this 1D model was coupled with a 2D model of the room using an implicit finite volume method for individual resolution of the façade. This study constitutes significant progress over the previous one as the mathematical model for the case study has been formulated in 3D. Nevertheless, the façade system can be reduced to a 1D problem, almost without reducing the general application of the model. The 3D model simulation for the room using CFD allows the thermal behaviour of the case study room to be established, improving results over those of the previous research and also incorporating the effects caused by the set of pillars placed indoors parallel to the active façade (Figure 1). This produces a truly 3D indoor distribution of the flow, conditioned by the vertical temperature gradient of the façade as well as by the mechanical ventilation in the room, now executed with greater precision.

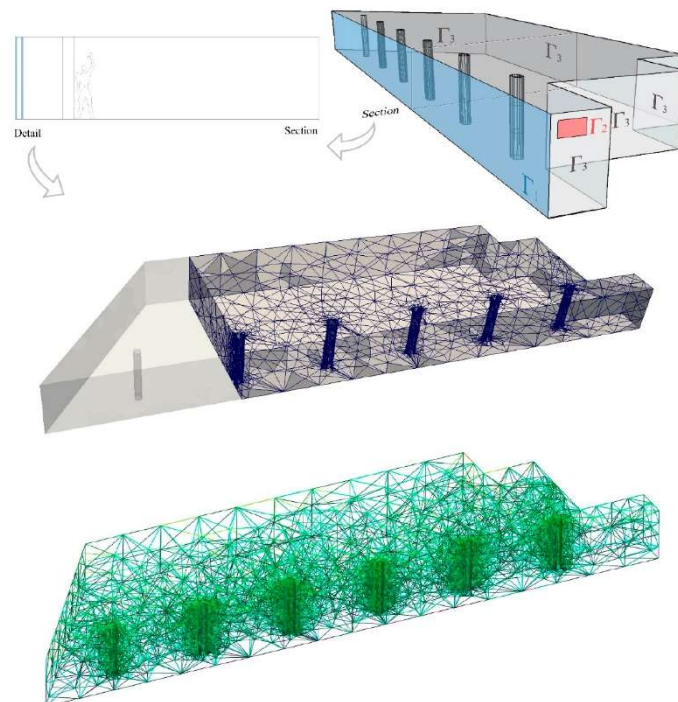


Figure 1. Plan of room and active transparent façade (ATF). Boundary labels for the problem (P_{room}) and details of the computational mesh.

2. A Coupled 3D CFD and ATF Model

This section presents a general model to solve the complete problem of ATFs, including the resolution of the dynamics within the room. As mentioned above, the study of the influence of the active façade systems in indoor temperatures [14] is challenging. This study is only possible if the whole system, façade and interior space are simulated as a single physical problem. Thus, the general framework includes a complete 3D formulation with interactions between the façade and the interior space. However, there are some ways of simplifying the numerical calculations without loss of generality. The aim is to work with a model that is accurate in calculations and not too computationally expensive.

The problem can be split into two systems. The first involves the calculation of the air and temperature dynamics inside the room adjacent to the ATF (P_{room}), while the second solves the thermal problem within the façade ($P_{\text{façade}}$). The natural coupling between these two systems affecting the thermal conditions must be defined.

Regarding the problem inside the room, \vec{u} is used to denote the 3d velocity field, while p is the pressure and T the temperature. Following this, the model is a coupling of the Navier-Stokes equations for incompressible fluids and a convection-diffusion equation for temperature. If considering a constant density of air ρ_a , it reads:

$$(P_{\text{room}}) \left\{ \begin{array}{l} \rho_a \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) - \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \nabla p = \rho_a \vec{g} \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \vec{u} = (0, 0, 0) \quad \text{on } \Gamma_1 \cup \Gamma_3 \\ \vec{u} = (-u_{in}, 0, 0) \quad \text{on } \Gamma_2 \\ \vec{u}(t=0) = \vec{u}^0 \\ p(t=0) = p^0 \\ \rho_a c_a V_r \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T - \kappa \Delta T \right) = \dot{E} \\ \rho_a c_a \kappa \frac{\partial T(t)}{\partial \vec{n}} = U_{in} (T(t) - T_{il}(t)) \quad \text{on } \Gamma_1 \\ T = T_{in} \quad \text{on } \Gamma_2 \\ \frac{\partial T(t)}{\partial \vec{n}} = 0 \quad \text{on } \Gamma_3 \\ T(t=0) = T^0 \end{array} \right. \quad (1)$$

The first two equations in this problem solve the dynamics of the air in the room where μ is the air dynamic viscosity and $\vec{g} = (0, 0, -g)$ the gravity force. The last convection-diffusion equation provides the temperature for the room where c_a is the air specific heat, V_r the volume of the room, κ the air thermal diffusion parameter, and \dot{E} a source term representing the total heat charge. Time is denoted by t . The initial conditions are denoted by superscript 0 for velocity, pressure and temperature. The boundary Γ_1 represents the internal layer of the façade wall; Γ_2 is the mechanical ventilation grille; and the rest of the walls are denoted by Γ_3 . It is assumed that there is an inflow condition with inlet velocity u_{in} and inlet temperature T_{in} in the ventilation grille.

The interaction of the room with the ATF is taken into account in the boundary conditions of the problem (P_{room}). It should be highlighted that the internal layer Γ_1 is the common surface in both systems. The influence of T , the temperature inside the room, in the evolution of the temperature of the internal layer T_{il} is already taken into account in its dynamic equation for each time t (see third equation in the façade problem ($P_{\text{façade}}$) defined in (3)). However, the influence of the temperature of this wall on the temperature inside the room is imposed through a time-dependent boundary condition:

$$\left. \frac{\partial T(t)}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma_1} = U_{il} (T(t) - T_{il}(t)) \quad (2)$$

This condition is applied for each time t where \vec{n} denotes the outer normal vector to the internal layer Γ_1 and U_{il} is the transmittance of the internal layer. Finally, a free boundary condition is considered for the rest of the walls Γ_3 , as temperature evolves according to room temperature.

The model presented to solve this system was introduced by Ismael et al. [31]. The thermal problem in the façade can be reduced to a 1D simplified model without loss of generality in the framework. The behaviour of the active wall is assumed to be uniform longitudinally, the focus is placed on a perpendicular section of the wall, maintaining the verticality and depth components (see the Figure 2 and Equation (3)). Subsequently, the evolution in time of the temperatures coupled in the active façade system (external wall, air cavity and inner wall) is resolved. The equations to solve this system involve the calculation of the three temperatures of the external layer T_{el} , internal layer T_{il} and the temperature of the air inside the cavity, T_a (see [32] for details). Hereafter, properties referring to the external layer are denoted by the subscript 'el', the air chamber by the subscript 'a', and the internal layer by the subscript 'il'. The system reads:

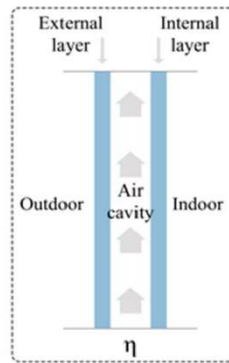


Figure 2. Sketch of the section of the façade.

$$(P_{\text{façade}}) \left\{ \begin{array}{l} (\rho c V)_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = -\eta c V \frac{\partial T_a}{\partial z} + U_a A (T_{el} - T_a) + U_a A (T_{il} - T_a) \\ (\rho V c)_{el} \frac{\partial T_{el}}{\partial t} = U_{el} A (T_{out} - T_{el}) + U_a A (T_a - T_{el}) \\ \quad + \sigma \epsilon_{el} A (T_{out}^4 - T_{el}^4) + \alpha_{el} A I_o + A \tilde{Q}_{el} \\ (\rho c V)_{il} \frac{\partial T_{il}}{\partial t} = U_{il} A (T - T_{il}) + U_a A (T_a - T_{il}) \\ \quad + \sigma \epsilon_{il} A (T^4 - T_{il}^4) + \alpha_{il} \tau_{el} A I_o + A \tilde{Q}_{il} \\ T_a = T_{imp} \quad \text{on } z = 0 \\ \frac{\partial T_a}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = H \\ T_a(t=0) = T_a^0 \\ T_{el}(t=0) = T_{el}^0 \\ T_{il}(t=0) = T_{il}^0 \end{array} \right. \quad (3)$$

with $z \in [0, L]$, L being the height of the wall and T the temperature inside the room (see notation in Table 1). Note that in cases where the external layer is opaque, the short wave transmission coefficient of the external layer τ_{el} in the last equation vanishes. Initial conditions for each temperature are denoted as before by superscript 0. The active system in the façade problem is included through the boundary conditions representing the flow supply into the cavity. The airflow temperature T_{imp} at the base of the cavity ($z = 0$) and a free boundary condition at the top ($z = H$) are imposed.

Table 1. Notation in problem ($P_{\text{façade}}$).

Symbols	Nomenclature
ρ	Density $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
c	Specific heat $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right] = \left[\frac{\text{Ws}}{\text{kg K}}\right]$
V	Volume $[\text{m}^3]$
η	Mass flow rate in the channel per unit area $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}\right]$
U	Transmittance $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$
A	Area $[\text{m}^2]$
σ	Stephan-Boltzman constant $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}\right]$
ε	Emissivity coefficient
α	Absorbance coefficient
τ	Short wave transmission coefficient
I_o	Solar radiation $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$
\tilde{Q}	Net radiant heat transfer per unit area $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$
T_{out}	Outdoor temperature [K]
Subscripts	
a	Façade air cavity
el	External layer of the façade
il	Internal layer of the façade

It should be noted that since the volume is $V_k = A \cdot w_k$, for w_k being the thickness of the layer k ($k = a, el, il$), the only geometrical measurement involved in this system is the thickness of each layer. The net radiant heat transfer per unit area $\tilde{Q}_k = \frac{Q_k}{A}$ is calculated as the difference between the rate of radiant energy leaving the surface per unit area J_k and the rate of irradiation received per unit area G_k , that is, $\tilde{Q}_k = J_k - G_k$. See [30] for further details.

The problem (P_{room}) is solved using FreeFEM3D software [32], the current version for 3D calculations with Finite Element Method of the original Freefem++ used in [30]. The numerical approximation of (P_{room}) is carried out directly using the mixed $\mathbb{P}_2 - \mathbb{P}_1$ Finite Element method in FreeFEM3D (3.61-1, Université Pierre et Marie Curie and Laboratoire Jacques-Louis Lions, Paris, France). Given that the problem ($P_{\text{façade}}$) is the same as in [30], further details on the numerical approximation can be found in this paper.

3. Application to the City of Refuge by Le Corbusier

This section focuses specifically on the application of the 3D model mentioned above to a dormitory in Le Corbusier's City of Refuge. Firstly, given that this problem has already been examined in previous research [30,31], it is appropriate to highlight innovations and improvements resulting from the use of the 3D model. Secondly, a description is provided for the specific boundary conditions and parameters appearing in the model for the case study. In addition to these, 'design parameters', specific data greatly affecting the comfort and energy efficiency of the system, are introduced here. Finally, the numerical results obtained in this framework for two cases, the design parameters originally proposed by Le Corbusier and a proposal for improving the energy efficiency of the combined system are presented and discussed.

3.1. The Case Study

The case study is a shared dormitory of Le Corbusier's City of Refuge (1929–1933) in Paris. This is the first known building where an ATF, termed *mur neutralisant* by its author, was developed. This system was devised to act in combination with mechanical ventilation in the room, known as

respiration exacte. In this case, the objective is to analyse the operation of the combined innovative solution of ATF-mechanical ventilation (*mur neutralisant-respiration exacte*).

This problem was already considered in previous papers [30,31] and solved using a simplified 2D model for a horizontal section of the room. The thermodynamics of the room (P_{room}) were calculated avoiding the vertical component of the magnitudes. Even if this approximation yields satisfactory results, the vertical component in the fluid dynamics of the air inside the room may play an important role, as can be seen in the 3D profile of the air dynamics relevant in the meeting with walls and pillars.

It should also be noted that as ventilation of the active façade occurs in a vertical direction, a temperature gradient is found along this glass wall, at least initially. Additionally, when applied to the City of Refuge, a mechanical ventilation system inside the room is considered. This involves a supplementary flow at a fixed height into the room which may strongly affect the vertical structure of the temperature.

All these considerations are now taken into account in the 3D model proposed. The objectives are therefore two-fold. The first of these, in terms of modelling and CFD, is the improvement of the results through the addition of the following effects:

- Real 3D geometry by including obstacles inside the room, such as pillars, that may influence the air circulation,
- 3D dynamic flow with vertical structure,
- Influence of the inflow conditioning inside the room in vertical behaviour,
- Influence of the vertical gradient of temperature in the ATF.

The second more analytical objective is to predict the thermal behaviour of the room under study, helping to:

- Further explore the conclusions about the climate system of the City of Refuge devised by Le Corbusier;
- Establish the relationship between the outdoor climate and the operating conditions of the combined *mur neutralisant-respiration exacte* system, for typical extreme weather conditions in Paris for both winter and summer, in search of an indoor comfort temperature;
- Establish the influence of occupation in order to meet the conditions for indoor comfort, for winter and summer, searching for an energy-efficient solution.

3.2. Specific 3D Model

The room analysed is 37.2 m long and 10 m deep, with a height $H = 3$ m and it was furnished with 67 beds. Six pillars at a distance of 1.32 m from the façade are lined up 4.75 m apart. It should be noted that occupancy is taken into account through the definition of the occupancy load \dot{E} . The beds are not considered in the generation of the mesh.

The south-facing ATF occupies the longest wall of the room. The system consists of two layers of glass, 7 mm thick and 3 m high, and separated by a 10 cm air cavity. Figure 1 shows the plan of the space under study and a picture of the computational mesh. A mesh with 20,739 tetrahedrons has been established to present the numerical results of this paper. A turbulent model was not considered for these simulations, given the range of the characteristic velocity norm corresponding to a laminar regime. Figure 3 shows the room and velocity vector coloured and scaled in terms of the velocity norm for the summer experiment presented in Section 3.3.3. The most unfavourable case studied is found in the summer when the maximum velocity value of the inflow velocity is imposed (3.55 m/s). It is observed that the characteristic velocity in the room is that of a laminar regime (the characteristic Reynold number is lower than 3000). Nevertheless, the 3D CFD coupled code developed can be also applied in turbulent regimes when needed.

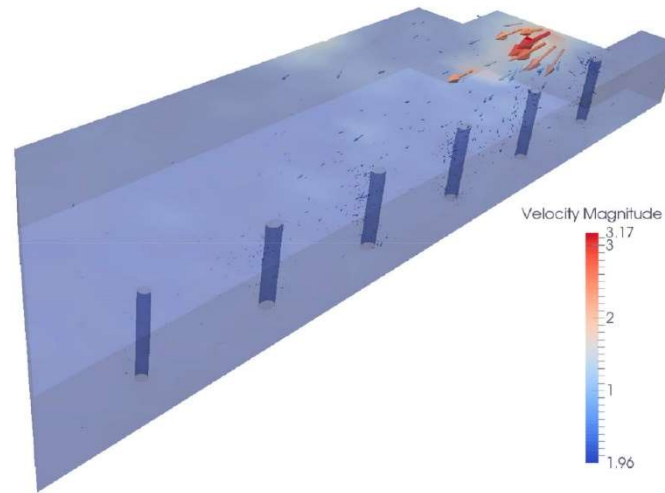


Figure 3. Room and velocity vector coloured and scaled in terms of the velocity norm for the case studied with maximum velocity value for inflow velocity.

The main purpose of this façade is to act as a barrier for the indoor space and to counteract the outdoor climate. In this sense, the ‘active’ action is to supply conditioned air through the cavity for heating in winter or cooling in summer. This entails two design parameters: airflow temperature by T_{imp} and the flow supply into the cavity in relation to the mass flow rate η . These parameters only affect the $(P_{façade})$ problem, the values of which are introduced in Section 3.3.2 below. The façade problem for the City of Refuge is studied by considering the system defined by Equation (3), where the values of fixed parameters are specified in Table 2. It should be noted that the values of I_o , T_{out} , and the initial data depend on winter or summer and are specified in Section 3.3.1.

Table 2. Fixed parameters involved in $(P_{façade})$ problem.

Parameter	External Layer	Air Cavity	Internal Layer
Density (kg/m^3)	$\rho_{el} = 2500$	$\rho_a = 1.293$	$\rho_{il} = 2500$
Specific heat (J/kg K)	$c_{el} = 750$	$c_a = 1004$	$c_{il} = 750$
Thickness (m)	$w_{el} = 0.007$	$w_a = 0.1$	$w_{il} = 0.007$
Transmittance ($\text{W/m}^2 \text{K}$)	$U_{el} = 5.69$	$U_a = 8$	$U_{il} = 5.69$
Emissivity	$\varepsilon_{el} = 0.07$	-	$\varepsilon_{il} = 0.07$
Absorbance	$\alpha_{el} = 0.14$	-	$\alpha_{il} = 0.14$
Short wave transmission	$\tau_{el} = 0.79$	-	-

The problem (P_{room}) is slightly more complex and requires the selection of additional parameters. The different boundaries of the 3D domain are tagged in Figure 1.

Specifically, mechanical ventilation is propelled into the room through a grille in the wall (marked as Γ_2 in red in Figure 1). The condition of the ventilation grille affects both the velocity and the temperature problems, known as inlet conditions and denoted by the subscript ‘in’. Thus, the design parameters for the problem (P_{room}) are the inlet temperature T_{in} , the inlet velocity u_{in} and the location and size of the ventilation grille.

As stated in the previous section, a free boundary condition is assumed at the walls (including the ceiling, floor and pillars). In the common boundary with the glazed wall (Γ_1) a time-dependent condition is assumed in terms of the transmittance U_{il} and the temperature of the internal layer of the façade system T_{il} as described in Equation (2). This condition is calculated for each time interval as a solution of the 1D problem $(P_{façade})$.

In the complete 3D model (1), the dynamic air viscosity is $\mu = 1.72 \times 10^{-5}$ kg/ms, the air thermal diffusion $\kappa = 1.9 \times 10^{-5}$ m²/s and the gravity force $g = 9.81$ m/s². The initial data together with the occupancy load \dot{E} are specified later in Section 3.3.1, and the design parameters are included in Tables 3 and 4.

3.3. Numerical Results

The coupled system $(P_{\text{room}})-(P_{\text{façade}})$ is solved for two climate situations, winter and summer, and for two representative days in each case, 29 and 30 December and 1 and 2 July respectively. For each of these the values for weather and initial data must be introduced. The design parameters defined in the previous section are also specified for each case. Furthermore, in Section 3.3.2 the simulation for the original climatic hypothesis by Le Corbusier is developed, followed by a proposal in Section 3.3.3 for a new climatic framework in order to obtain better results in comfort and energy efficiency.

3.3.1. Specific Data

The climate data for outdoor drybulb temperature (T_{out}) and solar radiation (I_o), as the sum of normal direct solar radiation and horizontal diffuse solar radiation, are taken from DesignBuilder software [33]. This tool allows climate data to be exported following the energy simulation. DesignBuilder uses the EnergyPlus data base [34], weather data by location: Europe WMO Region 6—France—Paris Orly 071490 (IWEC). Real initial values cannot be used in the City of Refuge for thermal magnitudes as the solution designed by Le Corbusier was never executed. Therefore, the initial values used here were obtained through the simulation of an energy model using DesignBuilder software. This model was generated in two areas: the case study room and the *mur neutralisant*.

The initial data for air temperature in the case study and cavity match the results of the operating temperature of energy simulation at 0:00 on the first day of study. The initial temperature data for glazing and walls were obtained from the radiant temperature values generated by DesignBuilder and based on the calculations of EnergyPlus. These initial values are specified below (Table 3):

Table 3. Initial data for (P_{room}) and $(P_{\text{façade}})$ problems.

Data	Winter	Summer
T_{el}^0 (°C)	−0.58	18.13
T_a^0 (°C)	2.48	20.26
T_{il}^0 (°C)	4.45	21.51
\vec{u}^0 (m/s)	0	0
p^0 (N/m ²)	0	0
T^0 (°C)	7.14	27.58

Finally, the occupancy load \dot{E} appearing in the temperature equation of the room is calculated for a ratio of 0.25 persons/m² and an energy load of 46 W/person; resulting in $\dot{E} = 3450$ W, from 18:00 to 08:00 h am each day.

3.3.2. Case 1: Original Hypothesis by Le Corbusier

In problem $(P_{\text{façade}})$ the airflow temperature to the ATF is fixed at 30 °C in winter and 15 °C in summer. The other parameter to be chosen is the supply flow into the air cavity, set at 216 m³/h, and the resulting mass flow is 0.7758 kg/sm², see [30] for details.

For the room problem (P_{room}) the mechanical ventilation is propelled into the room through a 0.9 m long and 0.5 m high grille located 2.28 m from the floor above the entrance door to the room (see Figure 1). The frontal velocity is fixed based on the ventilation flow, 300 m³/h in winter, resulting

in $u_{in} = 1.02$ m/s; and 1050 m³/h in summer, corresponding to $u_{in} = 3.55$ m/s. Table 4 shows the design data adopted by Le Corbusier in his proposed system.

Table 4. Design parameters for Case 1: Le Corbusier hypothesis.

Data	Winter	Summer
T_{imp} (°C)	30	15
η (kg /sm ²)	0.7758	0.7758
T_{in} (°C)	20	25
u_{in} (m/s)	1.02	3.55

Specifically, the plotted temperature of the room T is calculated as the average of the temperature obtained in the 29 probe points marked in Figure 4. Additionally, the average temperature for each column is plotted (Figures 6a and 8a), where column 1 is closest to the ventilation grille (points 0–3 in Figure 4) and for each row (Figures 6b and 8b), where row 1 is closest to the ATF (points 0, 4, 9, 14, 19, 24 in Figure 4).

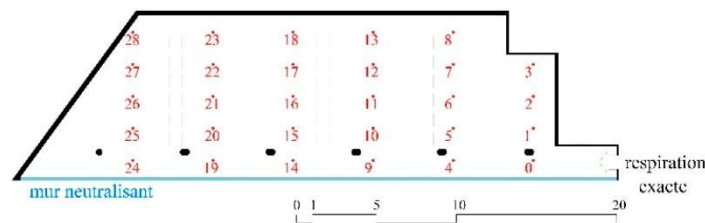


Figure 4. Probe points to measure the indoor temperature marked in red.

The results shown in Figures 5–9 reflect the data involved in the problems: outdoor temperature T_{out} , airflow temperature T_{imp} , inlet temperature T_{in} , radiation I_o and the different solutions, T_{il} , T_a , T_{el} , T at a height of 1.5 m. It should be noted that two y-axes format has been used in graphics plotting the radiation due to the different scales (Figures 5 and 7).

Figure 5 shows the winter temperatures. When the room is occupied (from 18:00 to 08:00 h), the mean indoor temperatures in the room tend to be rather uniform, between 26 °C and 28 °C. However, for the same time slot in summer (Figure 7) indoor temperature displays greater thermal oscillation, 16 °C–25 °C. This indoor temperature behaviour reflects the thermal oscillation of outdoor temperature T_{out} , which is greater in summer (maximum 28 °C and minimum 15 °C) and more uniform in winter (maximum 1 °C and minimum −6 °C). However, the indoor temperatures obtained are outside the comfort range detailed in international organization for standardization (ISO) 7730 [35]: 20–24 °C in winter and 23–26 °C in summer, as well as being far from the values of the airflow temperature for *respiration exacte* T_{in} considered by Le Corbusier: 20 °C in winter and 25 °C in summer.

In winter, with a constant airflow temperature of 30 °C in the air cavity of the *mur neutralisant*, the indoor temperature is higher than the comfort temperature, resulting in an increase in energy usage when the indoor temperature is higher than the comfort temperature, resulting in an energy increase when the air within the cavity is overheated. Equally, in summer with a constant airflow temperature in the cavity of 15 °C, indoor temperature is excessively low, also resulting in an unnecessary increase in energy usage, in this case due to excessive cooling of the air in the cavity. As Figures 5 and 7 show, the temperature in the façade air cavity greatly influences thermal behaviour within the room.

In terms of the results due to position in the room, defined by a point mesh with rows parallel to the *mur neutralisant* and columns perpendicular to it (Figure 4), in the hours in which the room is occupied in winter, the temperature results observed per row are very uniform, close to those of the mean temperature of the room (Figure 6b), while the scattering of temperature values is greater by

columns (Figure 6a), especially due to the limited reach of airflow. However, in summer the scattering is similar for rows and columns (Figure 8a,b).

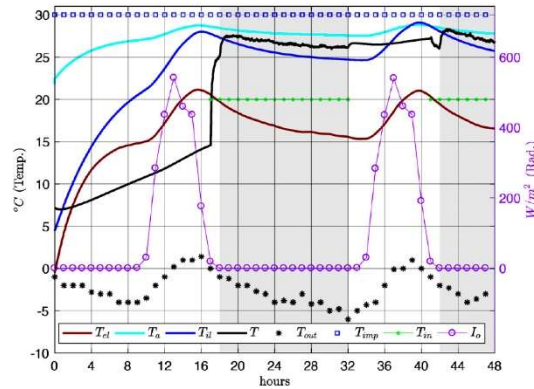


Figure 5. Case 1: Le Corbusier hypothesis. Winter. Data: calculated temperatures: T_{el} , T_a , T_{il} , T at a height of 1.5 m, outdoor temperature T_{out} , impulse temperature T_{imp} , inlet temperature T_{in} , all of them against the left y -axis, and radiation I_o against the right y -axis.

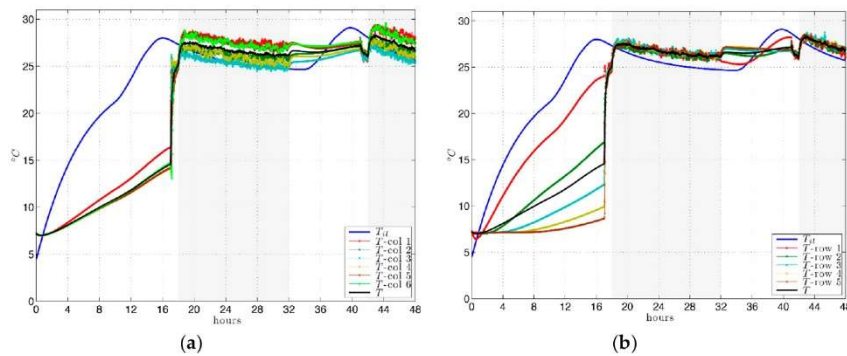


Figure 6. Case 1: Le Corbusier hypothesis. Winter. Internal layer temperature T_{il} and averaged room temperature T together with calculated indoor temperatures at the probe points given in Figure 3. (a) by columns; (b) by rows.

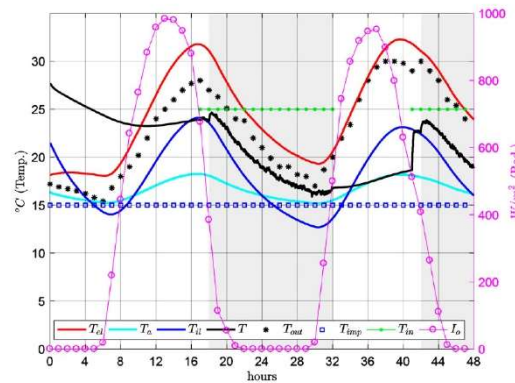


Figure 7. Case 1: Le Corbusier hypothesis. Summer. Data: calculated temperatures: T_{el} , T_a , T_{il} , T at a height of 1.5m, outdoor temperature T_{out} , impulse temperature T_{imp} , inlet temperature T_{in} , all of them against the left y -axis, and radiation I_o against the right y -axis.

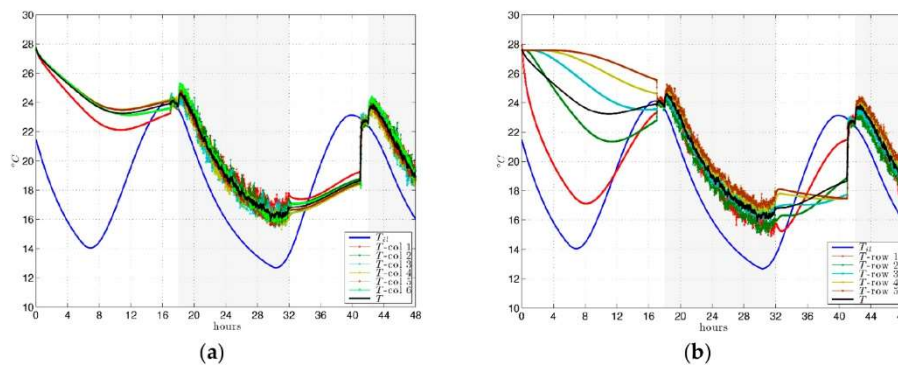


Figure 8. Case 1: Le Corbusier hypothesis. Summer. Internal layer temperature T_{il} and averaged room temperature T together with calculated indoor temperatures at the probe points given in Figure 4. (a) by columns; (b) by rows.

Although the combined effect proposed by Le Corbusier for the *mur neutralisant* and *respiration exacte* acts as a counterbalance for the influence of exterior conditions, comfort conditions and a suitable distribution of indoor temperatures could not be obtained efficiently.

Examining the temperature distribution in 3D images for winter and summer (Figure 9) and the videos (original_hyphotesis_winter.avi, Video S1: Simulation of Case 1: Le Corbusier hypothesis in winter, and original_hyphotesis_summer.avi, Video S2: Simulation of Case 1: Le Corbusier hypothesis in summer, on line) the following are observed:

- An incorrect airflow temperature into the cavity of the *mur neutralisant*, too high in winter and low in summer;
- A very limited reach of the airflow temperature of mechanical ventilation, due to insufficient flow both in winter ($300 \text{ m}^3/\text{h}$) and summer ($1050 \text{ m}^3/\text{h}$);
- The unsuitable position of the inlet grille for the mechanical ventilation system.

This, in combination with the shape of the room and column position, results in irregular temperature distribution in the room.

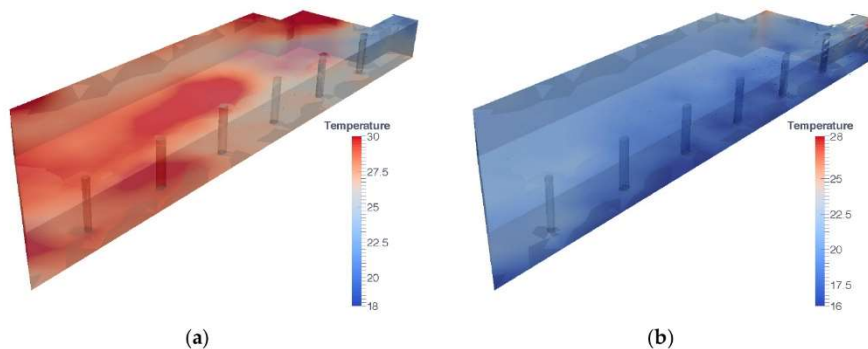


Figure 9. Case 1: Le Corbusier hypothesis. 3D image of temperature distribution at 00:00 hours on the second day of calculation. (a) winter; (b) summer.

3.3.3. Case 2: An Efficient Energy Proposal

An appropriate configuration of the ATF-mechanical ventilation system is proposed in order to ensure indoor comfort temperature with an energy efficient thermal conditioning system. Several solutions were considered for this data: constant or variable inlet temperature, time in operation in

relation to occupancy hours, different mass flows in the cavity and ventilation, different grille positions and sizes, etc. The proposal with the best results is presented below.

Some proposals are common to winter and summer cases:

- The use of the same thermal air flow treatment in the air cavity of the *mur neutralisant* and mechanical ventilation to ensure that the airflow temperature is the same in both cases.
- The mass flow in the cavity is the same as that proposed by Le Corbusier (Table 4).
- Modified position and size of ventilation grille in the room. As suggested by Liu et al. [36], a suitable air supply location and size improve the indoor environment. In case 1 its location in line with the pillars hinders the flow and the temperatures are not uniform along the room (see Figure 9). Moving the grille to the centre of the same wall and doubling its surface are proposed. In addition, airflow ventilation is modified to fit in a ventilation rate of 28.8 m³/h per person, common in this type of venue, leading to a frontal velocity of 3.25 m/s.
- The activation time of the ventilation system. Given that the aim of this is to ensure comfort in occupancy hours, mechanical ventilation is only activated one hour before occupancy, that is to say, from 17:00 to 20:00 p.m. each day.

All these hypotheses lead to a more uniform and compact system, which is only dependent on the appropriate airflow temperature for winter and summer. The specific airflow temperatures considered in winter and summer are examined below and summarised in Table 5 in order to improve the energy efficiency of the proposed system. In the summer case, the formula followed is that by Lyon considered in [30], which estimates the airflow temperature in terms of outdoor temperature and a reference temperature T_{ref} :

$$T_{Lyon} = T_{ref} - \frac{T_{out}}{5} \text{ (}^{\circ}\text{C)}. \quad (4)$$

In [30], $T_{ref} = 21.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ was used as in the original formula by Lyon, considered mostly for winter conditions. However, following different numerical simulations in the case analysed here, the decision was made to increase this reference temperature by 4 °C in order to better adjust the thermal solution:

$$T_{Lyon, modified} = 25.6 - \frac{T_{out}}{5} \text{ (}^{\circ}\text{C)}. \quad (5)$$

In this particular case it was observed that in some hours the temperature resulting from this formula is higher than the outdoor temperature. Therefore, a second option was proposed in search of an efficient energy system, that of recording the outdoor temperature for these hours. The airflow temperature is thus defined as the minimum of T_{out} and $T_{Lyon, modified}$ in each instance, as a free cooling system.

Initially, the Lyon formula was also considered for defining the airflow temperature in winter. However, on occasion, the result obtained was $T_{imp} > 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, involving a supplementary energy expense which was not necessary for achieving good indoor climate conditions. Subsequently, a constant airflow temperature of 20 °C was chosen.

Table 5. Design parameters for Case 2: Energy-efficient proposal.

Data	Winter	Summer	
		Without Free Cooling	Free Cooling
$T_{imp} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	20	$T_{Lyon, modified}$	$\min(T_{Lyon, modified}, T_{out})$
$\eta \text{ (kg/sm}^2\text{)}$	0.7758		0.7758
$T_{in} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	20	$T_{Lyon, modified}$	$\min(T_{Lyon, modified}, T_{out})$
$u_{in} \text{ (m/s)}$	3.25		3.25

The results are shown in Figures 10–16, in the same format as in case 1. The vertical range scale in figures was also maintained for ease of comparison.

Firstly, when observing the results for mean temperature in the room in winter (Figure 10), it is seen that in the hours of occupancy of the room the mean temperature remains relatively uniform, close to the comfort temperature: 20 °C–21 °C. The results dependent on the position of the probes (Figure 11) show little scatter, about ± 1 °C.

When comparing the results for the mean temperatures for the room for both summer proposals, with and without free cooling (Figures 12 and 14) and for the same hours, it is observed that considering only the airflow temperature based on the modified formula from Lyon, the indoor temperature is more uniform, with values of around 23 °C–26 °C, and therefore within the comfort range. However, Figure 12 shows that there is a large number of hours, from 0:00 to 8:00 a.m., in which the outdoor temperature is lower than the airflow according to Lyon’s formula. Consequently, if air is supplied in exterior conditions T_{out} in these last 8 hours of the occupancy of the room, both in the *mur neutralisant* and *respiration exacte*, demand is reduced, albeit with greater thermal oscillation in the room due to the great reduction in outdoor temperature at night, resulting in a mean indoor temperature below 20 °C from 4 a.m. to 8 a.m. approximately. As in the winter case, the interior temperature distribution is more uniform, as can be seen in the results by rows and columns (Figure 13 without free cooling and Figure 15 with free cooling).

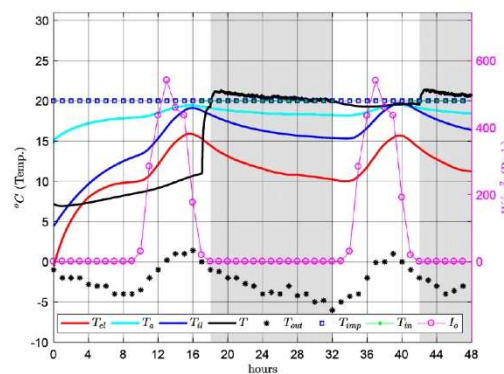


Figure 10. Case 2: Efficient energy proposal. Winter. Data: calculated temperatures: T_{el} , T_a , T_{il} , T at a height of 1.5m, outdoor temperature T_{out} , impulse temperature T_{imp} , inlet temperature T_{in} , all of them against the left y-axis, and radiation I_o against the right y-axis.

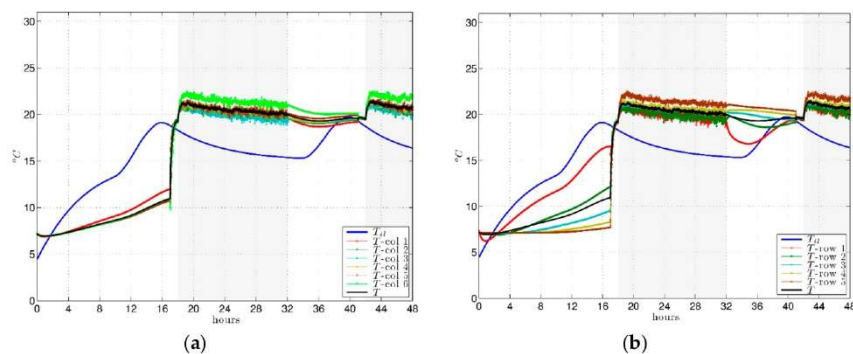


Figure 11. Case 2: Efficient energy proposal. Winter. Internal layer temperature T_{il} and averaged room temperature T together with calculated indoor temperatures at the probe points given in Figure 4. (a) by columns; (b) by rows.

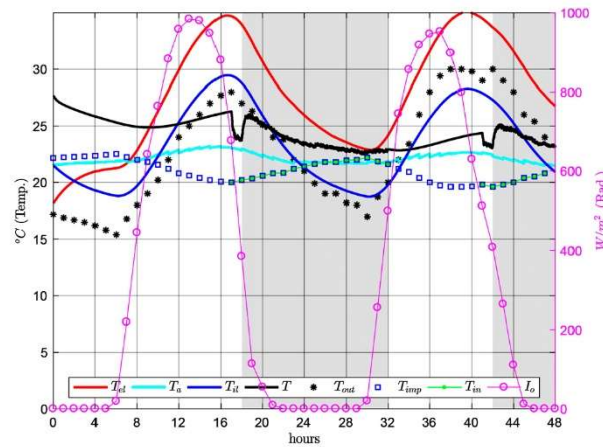


Figure 12. Case 2: Efficient energy proposal. Summer. Data: calculated temperatures: T_{el} , T_a , T_{il} , T at a height of 1.5m, outdoor temperature T_{out} , impulse temperature T_{imp} , inlet temperature T_{in} , all of them against the left y -axis and radiation I_o against the right y -axis.

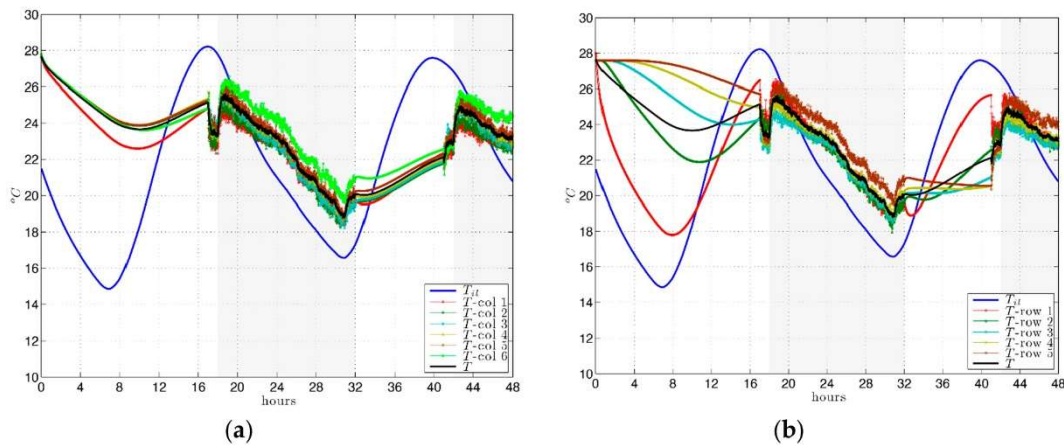


Figure 13. Case 2: Efficient energy proposal. Summer. Internal layer temperature T_{il} and averaged room temperature T together with calculated indoor temperatures at the probe points given in Figure 4. (a) by columns; (b) by rows.

In short, the modifications proposed as alternatives to Le Corbusier's own proposals constitute a substantial improvement, both in average indoor temperatures and in the temperature distribution within the room. However, given the large room size a slight variation is maintained depending on depth, as observed at the end of the room, on the opposite wall to the grille, in 3D images (Figure 15) and Supplementary Materials (efficient_energy_proposal_winter.avi, Video S3: Simulation of Case 2: Efficient energy proposal in winter, and efficient_energy_proposal_summer.avi, Video S4: Simulation of Case 2: Efficient energy proposal in summer, on line).

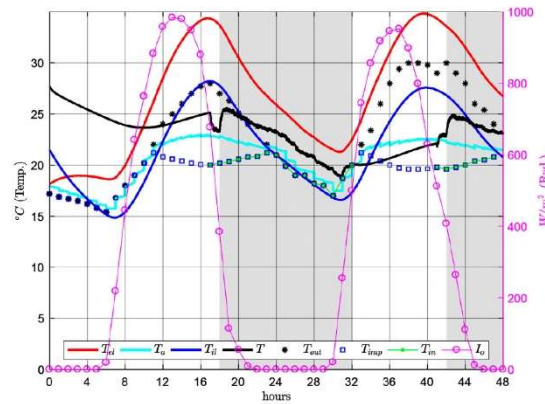


Figure 14. Case 2: Efficient energy proposal. Summer with free cooling. Data: calculated temperatures: T_{el} , T_a , T_{il} , T at a height of 1.5 m, outdoor temperature T_{out} , impulse temperature T_{imp} , inlet temperature T_{in} , all of them against the left y-axis and radiation I_o against the right y-axis.

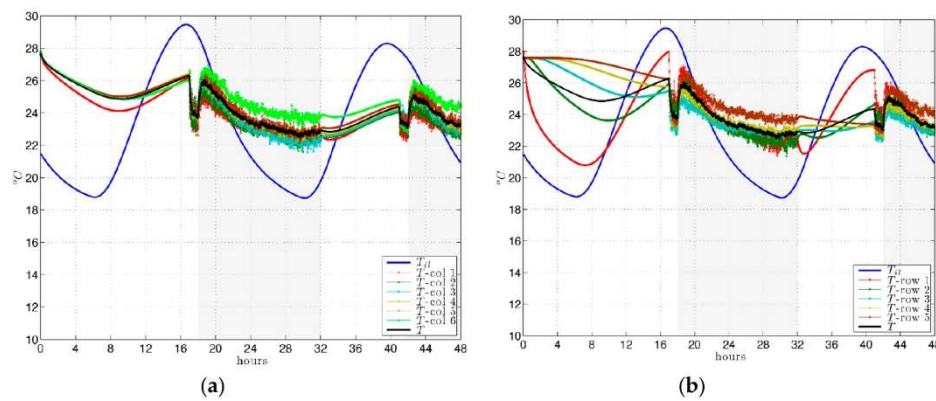


Figure 15. Case 2: Efficient energy proposal. Summer with free cooling. Internal layer temperature T_{il} and averaged room temperature T together with calculated indoor temperatures at the probe points given in Figure 4. (a) by columns; (b) by rows.

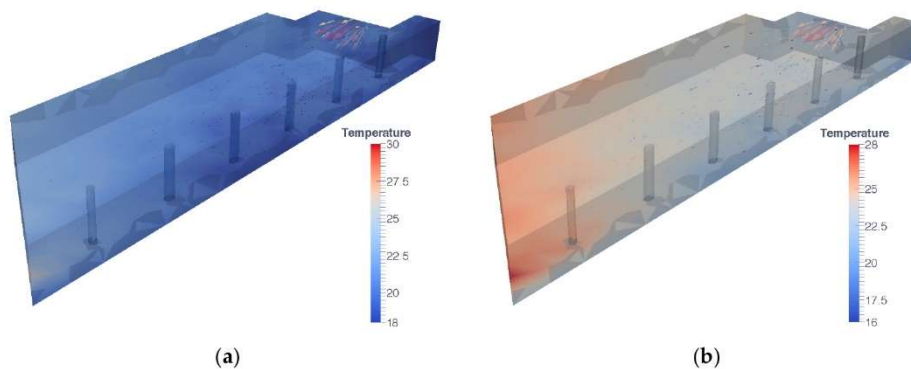


Figure 16. Case 2: Efficient energy proposal. 3D image of temperature distribution at 0:00 hours on the second day of calculation. (a) winter; (b) summer without free cooling.

4. Conclusions

The use of ATFs as building thermal envelopes needs to be complemented with mechanical ventilation systems in order to guarantee comfort and hygiene conditions within the buildings during hours of occupancy.

A 3D mathematical model was generated to simulate the behaviour of an ATF when combined with a mechanical ventilation system and the thermal effects these produce indoors. The proposed model uses FreeFEM3D for CFD-based thermal simulation. The model is for general application and allows the design parameters to be adapted for these two systems which can be combined depending on climate conditions, while taking into consideration the internal occupancy load.

This model was applied to the City of Refuge by Le Corbusier to assess indoor thermal conditions reached in the dormitory (occupied by 67 people from 18:00 pm to 08:00 am), assuming the façade had been executed following the design of Le Corbusier with an ATF (*mur neutralisant*), combined with a mechanical ventilation system (*respiration exacte*). This application confirms the validity of Le Corbusier's proposal, concluding that the combined effect of these two thermal systems counters the influence of outdoor conditions indoors. However, given that in his proposal the airflow temperatures are constant in the cavity of the *mur neutralisant*, 30 °C in winter and 15 °C in summer, and with *respiration exacte*, 20 °C in winter and 25 °C in summer, indoor temperatures are too high for indoor comfort conditions, thus increasing energy consumption.

The 3D mathematical model proposed allows the improvement of the solution put forward by Le Corbusier to obtain comfort conditions, increasing the energy efficiency of both systems combined in summer and in winter, mainly through the control of the airflow temperature into the air cavity of the ATF and the airflow supply into the room from the mechanical ventilation system.

Given the Parisian climate it is observed that on winter days with low outdoor temperatures, heating the airflow in order to supply it at a constant temperature of only 20 °C, both into the active cavity and into the room through the mechanical ventilation system, thermal comfort conditions are obtained in the case study room, with very stable mean temperatures: around 20 °C, at 1.5 m height, when occupied (afternoon and night).

Equally, on the hotter summer days indoor thermal comfort is also obtained, by slightly cooling the airflow to supply it, both into the cavity and the room, at a temperature 4 °C higher than that proposed by Lyon, around 20 °C, providing this value does not exceed outdoor temperature (free cooling conditions). The indoor thermal comfort obtained, with mean temperatures that are less stable than in winter, is around 19 °C–26 °C, at a height of 1.5 m, when occupied.

These conclusions can be applied to buildings with similar geometries, updating room dimensions, outdoor climate conditions, airflow temperature and speed. The process of applying the code to other geometries is a simple one as it simply requires a new computational mesh. The spacial variation of solar radiation is a code function which can be applied broadly. This variation of solar radiation in space and time can be taken into account in more precise simulations by coupling the CFD Freefem code with a 2D version of the ATF model presented in this paper.

Supplementary Materials: The following are original_hypohesis_winter.avi, Video S1: Simulation of Case 1: Le Corbusier hypothesis in winter. original_hypohesis_summer.avi, Video S2: Simulation of Case 1: Le Corbusier hypothesis in summer. efficient_energy_proposal_winter.avi, Video S3: Simulation of Case 2: Efficient energy proposal in winter. efficient_energy_proposal_summer.avi, Video S4: Simulation of Case 2: Efficient energy proposal in summer.

Author Contributions: C.R.-B., J.J.S. and R.S. conceived and designed the experiments; C.R.-B., E.F.-N. and G.N.-R. developed the software; all authors analysed the data; all authors have written, reviewed and approved the final manuscript.

Funding: This research was partially supported by the Spanish Government and FEDER grant number [MTM2015-70490-C2-2-R].

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

References

1. Gratia, E.; de Herde, A. Optimal operation of a south double-skin façade. *Energy Build.* **2004**, *36*, 41–60. [\[CrossRef\]](#)
2. Hien, W.N.; Liping, W.; Chandra, A.N.; Pandey, A.R.; Xiaolin, W. Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. *Energy Build.* **2005**, *37*, 563–572. [\[CrossRef\]](#)
3. Gratia, E.; De Herde, A. The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. *Energy Build.* **2007**, *39*, 364–373. [\[CrossRef\]](#)
4. Barbosa, S.; Ip, K. Perspectives of double-skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *40*, 1019–1029. [\[CrossRef\]](#)
5. Hazem, A.; Ameghchouche, M.; Bougriou, C. A numerical analysis of the air ventilation management and assessment of the behavior of double skin facades. *Energy Build.* **2015**, *102*, 225–236. [\[CrossRef\]](#)
6. Flores Larsen, S.; Rengifo, L.; Filippín, C. Double skin glazed façades in sunny Mediterranean climates. *Energy Build.* **2015**, *102*, 18–31. [\[CrossRef\]](#)
7. Gelesz, A.; Reith, A. Climate-based Performance Evaluation of Double Skin Facades by Building Energy Modelling in Central Europe. *Energy Procedia* **2015**, *78*, 555–560. [\[CrossRef\]](#)
8. Graf, F.; Marino, G. *Les Dispositifs du Confort dans L'architecture du XXe Siècle: Connaissance et Stratégies de Sauvegarde*; Presses Polytechniques et Universitaires Romandes: Lausanne, Switzerland, 2016; ISBN 978-2-88915-062-5.
9. Zuazua-Ros, A.; Martín-Gómez, C.; Bermejo-Busto, J.; Vidaurre-Arbizu, M.; Baquero, E.; Miranda, R. Thermal energy performance in working-spaces from biomorphic models: The tuna case in an office building. *Build. Simul.* **2016**, *9*, 347–357. [\[CrossRef\]](#)
10. Ibañez-Puy, M.; Martín-Gómez, C.; Bermejo-Busto, J.; Sacristán, J.A.; Ibañez-Puy, E. Ventilated Active Thermoelectric Envelope (VATE): Analysis of its energy performance when integrated in a building. *Energy Build.* **2018**, *158*, 1586–1592. [\[CrossRef\]](#)
11. Ramírez Balas, C.; Suárez Medina, R.; Sendra Salas, J.J. Future technologies in Le Corbusier's environmental conditioning systems: City of Refuge in Paris. In Proceedings of the 29th International Conference—Sustainable Architecture for a Renewable Future, München, Germany, 10–12 September 2013.
12. Bryan, H. Le Corbusier and the Mur Neutralisant: An Early Experiment in Double Envelope Construction. In Proceedings of the Ninth International PLEA Conference, Seville, Spain, 22–24 September 1991; ISBN 0792314182 9780792314189.
13. Le, C. *Précisions sur un État Present Del'architecture et Del'urbanisme*; Collection de "L'Esprit Nouveau"; G. Crès: Paris, France, 1930.
14. Taylor, B.B. *La Cité de Refuge di Le Corbusier*; Officina Edizioni: Roma, Italian, 1979.
15. Brooks, A. *Le Corbusier: Armée du Salut-Cité de Refuge*; Garland Publishing: New York, NY, USA, 1983.
16. James Inglis, D. *Le Corbusier: The City of Refuge, Paris 1929–1933*; University of Chicago Press: Chicago, IL, USA, 1987.
17. Harris, S. From L'ir Exact to L'Aérateur: Ventilation and its Evolution in the Architectural Work of Le Corbusier. In *The Green Braid: Towards an Architecture of Ecology, Economy and Equity*; Judith, K., Kenneth, S., Eds.; Routledge: London, UK, 2007; pp. 140–152.
18. Manz, H.; Schaelin, A.; Simmler, H. Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double facades. *Build. Environ.* **2004**, *39*, 1023–1033. [\[CrossRef\]](#)
19. Fallahi, A.; Haghighat, F.; Elsadi, H. Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. *Energy Build.* **2010**, *42*, 1499–1509. [\[CrossRef\]](#)
20. Pappas, A.; Zhai, Z. Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy—Driven airflow. *Energy Build.* **2008**, *40*, 466–475. [\[CrossRef\]](#)
21. Kim, D.W.; Park, C.S. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus. *Energy Build.* **2011**, *43*, 3635–3645. [\[CrossRef\]](#)
22. Kim, D.W.; Park, C.S. Corrigendum to "Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus". *Energy Build.* **2012**, *49*, 647. [\[CrossRef\]](#)

23. Guardo, A.; Coussirat, M.; Egusquiza, E.; Alavedra, P.; Castilla, R. A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates. *Energy Build.* **2009**, *41*, 534–542. [CrossRef]
24. Ascione, F.; De Masi, R.F.; De Rossi, F.; Ruggiero, S.; Vanoli, G.P. MATRIX, a multi activity test-room for evaluating the energy performances of ‘building/HVAC’ systems in Mediterranean climate: Experimental set-up and CFD/BPS numerical modeling. *Energy Build.* **2016**, *126*, 424–446. [CrossRef]
25. Peng, L.; Nielsen, P.V.; Wang, X.; Sadrizadeh, S.; Liu, L.; Li, Y. Possible user-dependent CFD predictions of transitional flow in building ventilation. *Build. Environ.* **2016**, *99*, 130–141. [CrossRef]
26. Berger, J.; Mazuroski, W.; Mendes, N.; Guernouti, S.; Woloszyn, M. 2D whole-building hygrothermal simulation analysis based on a PGD reduced order model. *Energy Build.* **2016**, *112*, 49–61. [CrossRef]
27. Fuliotto, R.; Cambuli, F.; Mandas, N.; Bacchin, N.; Manara, G.; Chen, Q. Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade. *Energy Build.* **2010**, *42*, 23–28. [CrossRef]
28. Banham, R. *The Architecture of the Well-Tempered Environment*; Architectural Press: London, UK, 1969.
29. Ramírez-Balas, C.; Fernández-Nieto, E.D.; Narbona-Reina, G.; Sendra, J.J.; Suárez, R. Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to “The City of Refuge” by Le Corbusier. *Energy Build.* **2015**, *86*, 708–722. [CrossRef]
30. Ramírez Balas, C.; Sendra Salas, J.J.; Suárez Medina, R.; Fernández Nieto, E.D.; Narbona Reina, G. The mur neutralisant as an active thermal system: Saint Gobain tests (1931) versus CFD simulation (2015). In *LC2015-Le Corbusier, 50 Years Later*; Universitat Politècnica de València: Valencia, Spain, 2015.
31. Ismail, K.A.R.; Henríquez, J.R. Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions. *Appl. Therm. Eng.* **2006**, *26*, 295–302. [CrossRef]
32. FreeFEM3D. Available online: <http://www.freefem.org/ff3d/> (accessed on 25 July 2017).
33. DesignBuilder v.2.4.2.026. Available online: <http://www.designbuilder.es/descargas/software-designbuilder> (accessed on 27 November 2017).
34. EnergyPlus. Available online: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/FRA/FRA_Paris.Orly.071490_IWEC (accessed on 17 July 2017).
35. ISO 7730:2005. Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. Available online: <https://www.iso.org/standard/39155.html> (accessed on 15 November 2005).
36. Liu, W.; Jin, M.; Chen, Ch.; Chen, Q. Optimization of air supply location, size, and parameters in enclosed environments using a computational fluid dynamics-based adjoint method. *J. Build. Perform. Simul.* **2016**, *9*, 149–161. [CrossRef]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

9.3. Discusión de resultados

En esta cuarta publicación se ha desarrollado un nuevo modelo numérico, más complejo que el anterior, basado en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Método de Elementos Finitos (FEM), para evaluar el comportamiento térmico y energético en una habitación climatizada con un sistema térmico compuesto por una Fachada Activa Transparente (ATF) y un sistema de ventilación mecánica, que no tienen que ser necesariamente los propuestos por Le Corbusier para la Ciudad del Refugio en París.

Se han contemplado dos estaciones: invierno y verano, correspondientes a dos modos de operación: calefacción y refrigeración, y para dos días representativos en cada caso, 29 y 30 de diciembre y 1 y 2 de julio, respectivamente, habiendo elegido como archivo climático el de Francia – París Orly 071490 (IWECC). Para las cargas de ocupación, se ha estimado una ratio de 1 pers./4 m² y una carga total por ocupante de 46 W, lo que nos da una carga total de ocupación de 3450 W, entre las 18:00 h y las 08:00 todos los días de la semana.

Las simulaciones se han hecho contemplando dos hipótesis: propuesta de Le Corbusier y propuesta alternativa más eficiente energéticamente.

8.3.1. Hipótesis 1: Propuesta de Le Corbusier

Siguiendo los cálculos realizados por G. Lyon y los ensayos efectuados por los ingenieros de Saint Gobain a la propuesta de Le Corbusier, la temperatura de impulsión en la cámara de aire intermedia de la ATF (T_{imp}) se fija en 30 °C en invierno y 15 °C en verano, y su caudal en 216 m³/h, siendo el flujo másico resultante $\eta = 0.7758$ kg/sm² (Tabla 4). La ventilación mecánica es impulsada a la habitación a través de una rejilla de 900 x 500 mm, localizada a 2.28 m de altura y situada encima de la puerta de entrada a la habitación (Fig. 70). La velocidad frontal se fija en función del caudal de ventilación, 300 m³/h en invierno y 1050 m³/h en verano, resultando $u = 1.02$ m/s; y $u = 3.55$ m/s, respectivamente (Tabla 4).

Data	Winter	Summer
T_{imp} (°C)	30	15
η (kg/sm ²)	0.7758	0.7758
T_{in} (°C)	20	25
u_{in} (m/s)	1.02	3.55

Tabla 4. Parámetros de diseño para la Hipótesis 1: Propuesta de Le Corbusier.

9. Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada activa transparente de doble piel y un sistema de ventilación mecánica

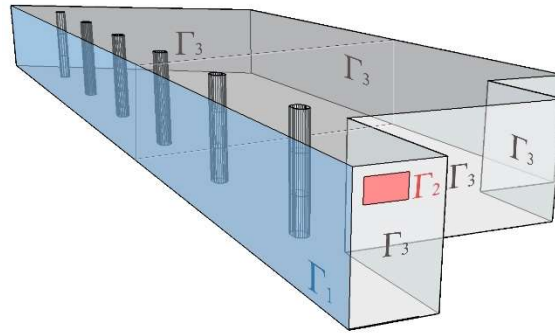


Figura 70. Modelado de habitación y fachada activa, ATF. Etiquetas de contornos para el problema (P_{room}).

Los resultados de la simulación se han obtenido en la malla de puntos representada en la figura 71.

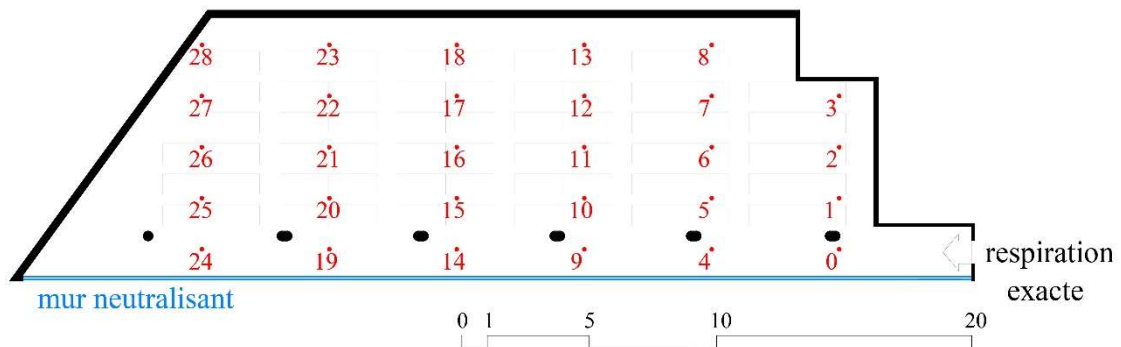


Figura 71. Puntos de medida de la temperatura interior (*) marcados en rojo.

En las figuras 72 y 73 se han representado los resultados para invierno, y en las figuras 74 y 75 los resultados para verano. Los símbolos utilizados para los parámetros son los siguientes: temperatura exterior T_{out} ; intensidad de radiación I_o , temperatura del flujo de aire T_{imp} , temperatura de salida de aire de la ventilación mecánica (rejilla) T_{in} ; temperatura interior a 1.5 m de altura T y las diferentes temperaturas, T_{il} , T_a , T_{el} , temperatura del vidrio interior, temperatura de la cámara activa y temperatura del vidrio exterior, también calculadas a una altura de 1.5 m. La temperatura interior en la habitación, T , es calculada como el promedio de las temperaturas obtenidas en los 29 puntos de la malla (Fig. 71). Además, se ha representado la temperatura promedio para cada columna de la malla de puntos (figuras 73a y 75a), denominando columna 1 la que está más cerca de la rejilla de ventilación (puntos 0, 1, 2, 3 en la figura 71), y para cada fila de la malla (figuras 73b y 75b), denominando fila 1 la que está más cerca de la ATF (puntos 0, 4, 9, 14, 19, 24 en la figura 71).

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

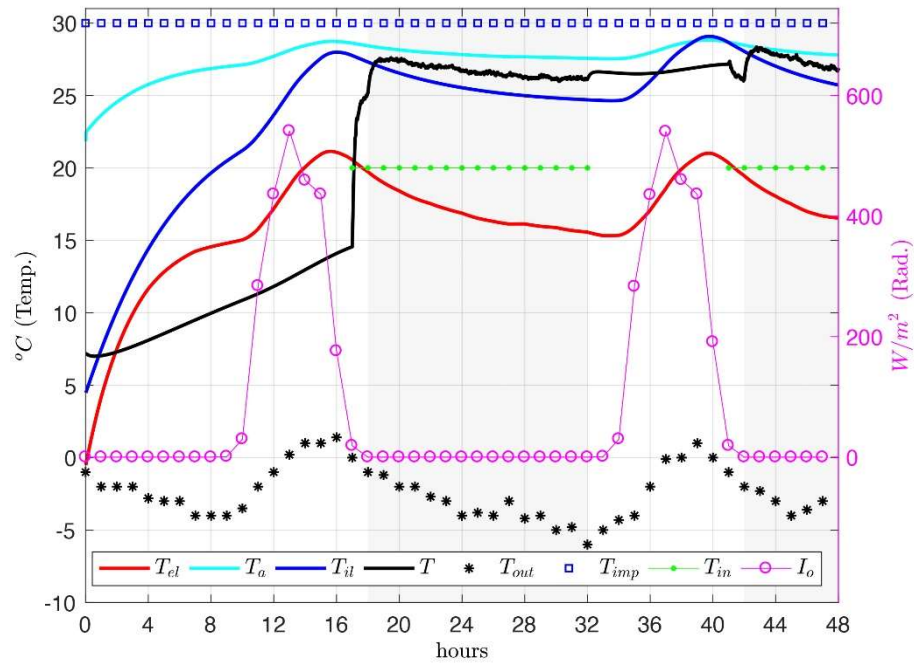


Figure 72. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Invierno. Datos: temperaturas calculadas: T_{el} , T_a , T_{il} , T a una altura de 1.5 m, temperatura exterior T_{out} , temperatura de impulsión T_{imp} , temperatura interior T , todos en el eje Y izquierdo, y radiación I_o en el eje Y derecho.

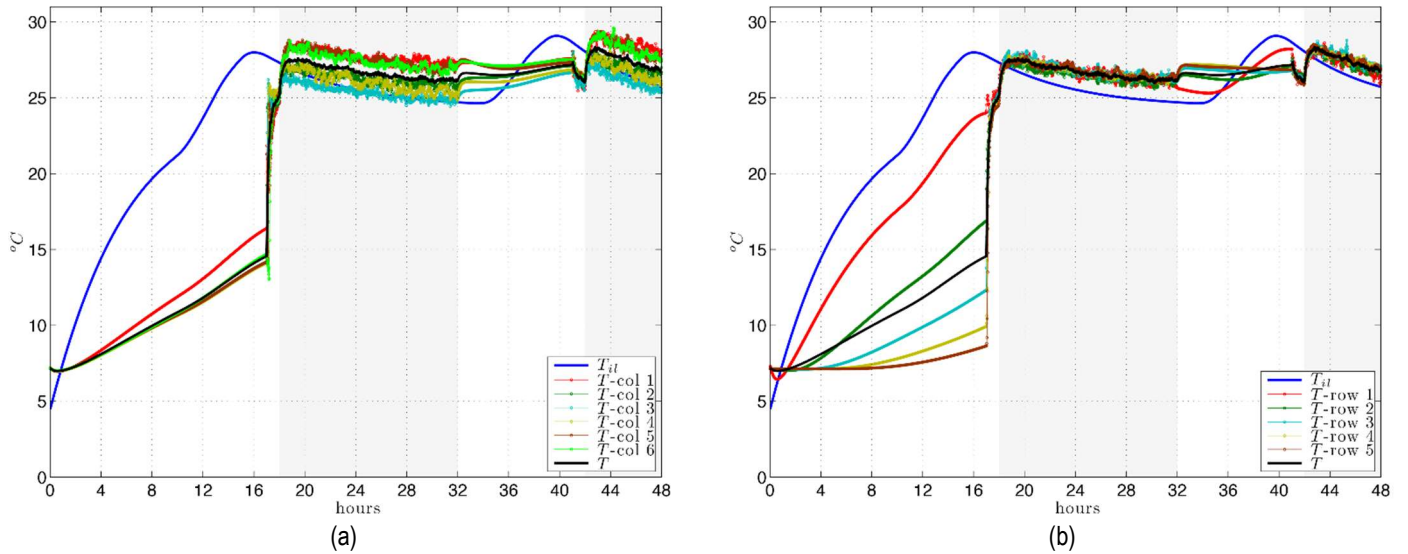


Figure 73. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Invierno. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores en los puntos dados en la Figura 71: (a) por columnas; (b) por filas.

9. Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada activa transparente de doble piel
y un sistema de ventilación mecánica

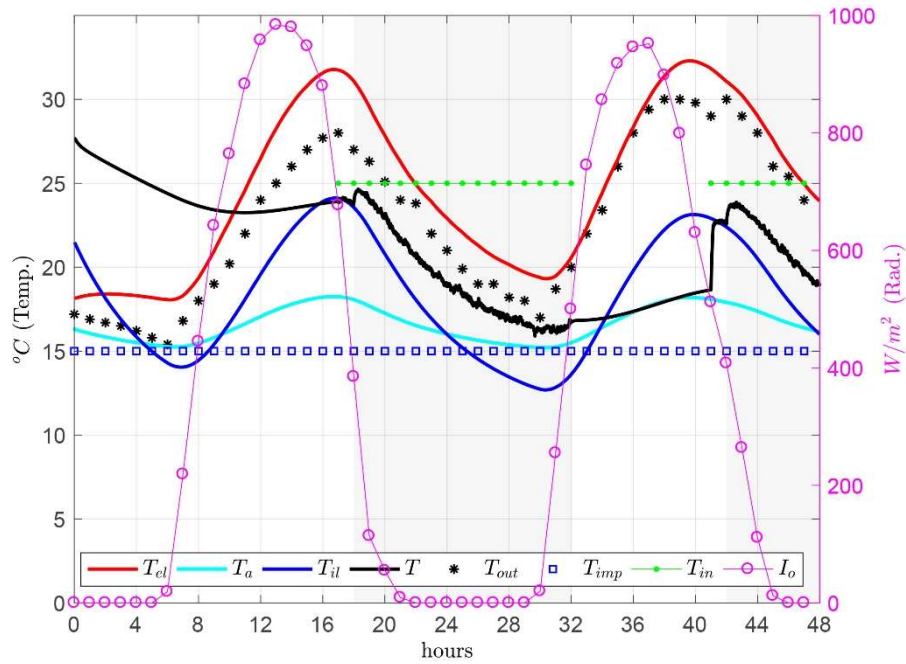


Figure 74. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Verano. Datos: temperaturas calculadas: T_{el} , T_a , T_{il} , T a una altura de 1.5m, temperatura exterior T_{out} , temperatura de impulsión T_{imp} , temperatura interior T , todos en el eje Y izquierdo, y radiación I_o en el eje Y derecho.

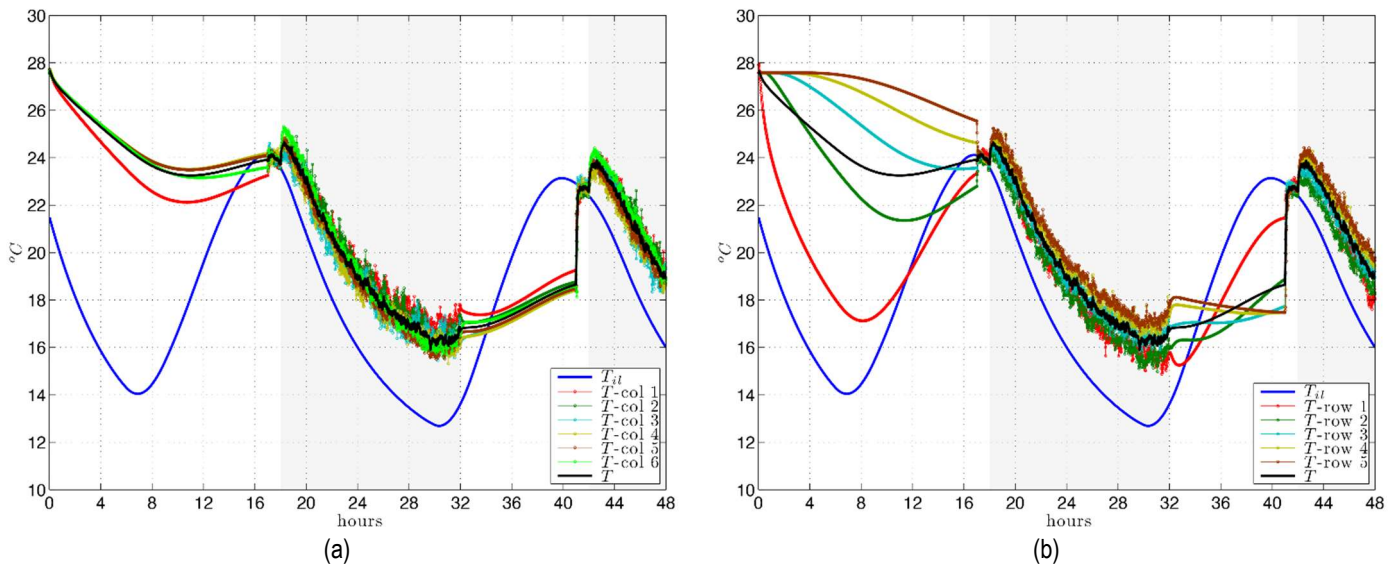


Figure 75. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Verano. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores en los puntos dados en la Figura 71: (a) por columnas; (b) por filas.

En invierno, cuando la habitación está totalmente ocupada (de 18:00 a 08:00 h solares), con la consiguiente carga de ocupación, si la temperatura de impulsión del aire en la cámara (T_{imp}) del muro neutralizantes es de 30 °C y la temperatura de impulsión de la ventilación en la habitación (T_{in}) es de 20 °C, las temperaturas interiores medias en la habitación tienden a ser bastante uniformes: entre 26 °C y 28 °C (Fig. 72), valores claramente por encima del rango de confort que indica la norma ISO 7730:2005 [1] que lo sitúa en 20-24

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

°C. Se produce, por tanto, un exceso de consumo energético, lo que indica que se impulsa aire en la cámara con mayor temperatura o caudal del necesario.

Si analizamos la distribución de temperaturas interiores en la malla de puntos (Fig. 71) en esa misma franja horaria, se puede observar que esa distribución es muy uniforme por filas (Fig. 73b), con valores de temperaturas cercanos a la temperatura media de la habitación, mientras que se produce una mayor dispersión por columnas (Fig. 73a), sobre todo debido al limitado alcance de la vena de aire de la respiración exacta, con un caudal de ventilación bajo: 300 m³/h.

En verano, para la misma franja horaria, con la carga de ocupación considerada, si la temperatura del aire de impulsión en la cámara (T_{imp}) es de 15 °C y la temperatura de impulsión de la ventilación en la habitación, (T_{in}), es de 25 °C, las temperaturas medias interiores en la habitación presentan una mayor oscilación térmica: 16 °C-25 °C (Fig. 74). Este desigual comportamiento de la temperatura interior respecto de lo que ocurre en invierno es reflejo de la oscilación térmica de la temperatura exterior, T_{out} . Ésta es significativamente mayor en verano (máximo 28 °C y mínima en torno a 16 °C y 17 °C en esa franja horaria) que en invierno (máximo en torno a -1 °C y mínimo -6 °C en esa franja horaria). Por tanto, las temperaturas interiores obtenidas están durante bastante tiempo de esa franja horaria fuera del rango de confort establecido por la citada norma ISO 7730:2005 [1]: 23-26°C, principalmente por la impulsión de aire excesivamente frío en la cámara del muro neutralizante, lo que también produce un exceso de consumo energético.

A diferencia del periodo de invierno, el análisis de la distribución por filas y columnas de la malla da resultados más uniformes, especialmente debido a que el caudal de ventilación en verano, 1050 m³/h, es 3,5 veces al de invierno, por la misma rejilla de impulsión, lo que aumenta significativamente el alcance de la vena fluida (Fig. 75).

En suma, aunque el efecto combinado de la acción del muro neutralizante y la respiración exacta propuestos por Le Corbusier contrarrestan las condiciones exteriores, no lo hacen de modo eficiente desde un punto de vista energético. Además, tal y como puede observarse en la figura 70, tanto en verano como en invierno, la posición de la rejilla de ventilación no es la más adecuada para lograr una adecuada distribución uniforme de temperaturas, al estar muy afectada la vena fluida por la fila de pilares que se dispone paralelamente a fachada. Este negativo efecto se puede apreciar con mayor claridad en sendos vídeos que se presentan como anexo a esta tesis. La figura 76 es el resultado de una captura de pantalla de esos vídeos.

9. Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada active transparente de doble piel y un sistema de ventilación mecánica

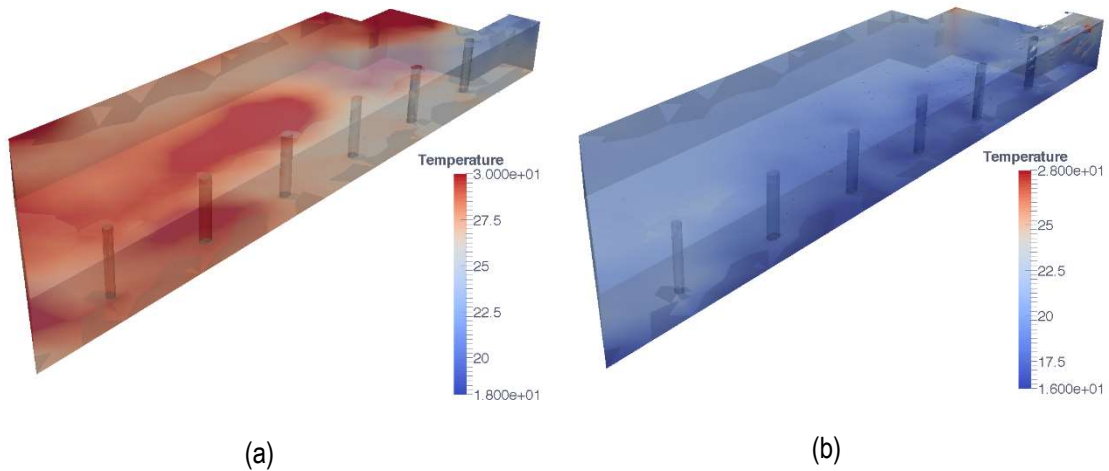


Figura 76. Hipótesis 1: Propuesta de Le Corbusier. Imagen 3D de la distribución de la temperatura a las 00:00 horas en el segundo día de cálculo: a) invierno, b) verano.

8.3.2. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente.

Como aplicación del modelo numérico generado, y partiendo de la propuesta realizada por Le Corbusier del efecto combinado de muro neutralizante y respiración exacta para la Ciudad del Refugio de París, se propone una configuración apropiada de ATF-sistema de ventilación mecánica, con el fin de garantizar una temperatura de confort interior con un sistema de acondicionamiento térmico energéticamente eficiente.

Para llegar a esta propuesta, ha sido necesario realizar distintas simulaciones con el modelo numérico generado, con temperaturas del aire impulsado en la cámara intermedia, para una determinada estación, constantes o variables en función de la temperatura exterior; con diferentes caudales de impulsión de aire en la cámara y en la habitación, con diversas posiciones y tamaños de la rejilla de ventilación; con diversas condiciones operacionales; etc. Como consecuencia de los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta investigaciones previas, como las de Liu et al. [2], se exponen a continuación las principales modificaciones realizadas sobre la propuesta de Le Corbusier:

- Se ha modificado el caudal de ventilación para acercarlo a los estándares de exigencias actuales sobre calidad de aire interior: $28.8 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{pers.}$, independientemente de que se trate de invierno o verano.
- En consonancia, con lo anterior, se ha duplicado la superficie de la rejilla de ventilación, lo que da lugar a una velocidad frontal del aire (u_{in}) en esa rejilla de 3.25 m/s .

Se ha modificado la posición de la rejilla de ventilación en la habitación, desplazándola al centro de la misma pared, para paliar el efecto desfavorable de la fila de pilares paralela a la ATF.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

- Se ha modificado el calendario de ventilación para aumentar una hora su franja horaria: de 17:00 a 20:00 horas solares, con objeto de que esta instalación se active una hora antes de que la habitación sea ocupada.
- Se ha efectuado una modificación de la fórmula de G. Lyon para obtener la temperatura de impulsión de la cámara en condiciones de verano, con presencia de radiación solar, aumentando en 4 °C la temperatura resultante.
- Con el fin de mejorar la eficiencia energética del sistema en condiciones de verano, se ha considerado la posibilidad de que, cuando se den las condiciones, tanto la ventilación como la impulsión de aire en la cámara se realicen por *free-cooling*, con el consiguiente ahorro energético. Por tanto, para la temperatura de impulsión en la cámara se plantea adoptar el menor de los valores siguientes: temperatura calculada por la fórmula de G. Lyon modificada y temperatura del aire exterior.
- En condiciones de invierno, se ha considerado una temperatura de impulsión de aire en la cámara constante de 20 °C, diez grados inferior a la propuesta por G. Lyon y los ingenieros de Saint Gobain, lo que mejorará notablemente la eficiencia energética del sistema.

En la tabla 5 se reflejan los principales parámetros de diseño contemplados.

Datos	Invierno	Verano	
		Sin Free cooling	Con Free cooling
T_{imp} (°C)	20	$T_{Lyon,modified}$	$\min(T_{Lyon,modified}, T_{out})$
η (kg/sm ²)	0.7758	0.7758	
T_{in} (°C)	20	$T_{Lyon,modified}$	$\min(T_{Lyon,modified}, T_{out})$
u_{in} (m/s)	3.25	3.25	

Tabla 5. Parámetros de diseño para la Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente.

En invierno, cuando la habitación está ocupada, las temperaturas interiores medias en la habitación tienden a ser muy uniformes: entre 20 °C y 21 °C (Fig. 77), valores situados en el rango de confort que indica la norma ISO 7730:2005 [1]. Además, se produce muy poca dispersión de los valores obtenidos en la malla de puntos, tanto por columnas (Fig. 78a) como por filas (Fig. 78b): ± 1 °C.

En verano, se han analizado los resultados sin y con *free-cooling* cuando la habitación está ocupada. En el primer caso, los resultados de las temperaturas medias de la habitación oscilan entre 23 °C y 26 °C (Fig. 79), manteniéndose en la banda de confort, y reduciéndose sensiblemente la oscilación térmica respecto a los resultados obtenidos con la propuesta de Le Corbusier. Además, la distribución de temperaturas es bastante uniforme en las filas y columnas de la malla (Fig. 71). Sin embargo, en la figura 80 se puede

observar que en el periodo comprendido entre las 0:00 a 8:00 h la temperatura exterior es más baja que la temperatura del aire impulsada en la cámara. Si, con el objetivo de aumentar la eficiencia energética del sistema, tanto en la habitación como en la cámara se impulsa en esas horas el aire en condiciones del aire exterior, la oscilación térmica es mayor: entre 19 °C y 26 °C (Fig. 81), aumentando ligeramente el porcentaje de horas en las que se está fuera del rango de confort, aunque la demanda se reduce sensiblemente. Esto es debido a la gran reducción de la temperatura exterior durante la noche, lo que da lugar a una temperatura interior promedio inferior a 20 °C entre las 4 a.m y las 8 a.m., aproximadamente. Al igual que en el caso de invierno, en las dos hipótesis de funcionamiento: sin y con *free-cooling*, la temperatura interior se distribuye de manera más uniforme en la habitación que con la propuesta de Le Corbusier, como se puede ver en los resultados por filas y columnas (Fig. 80 sin *free cooling* y Fig. 82 con *free cooling*).

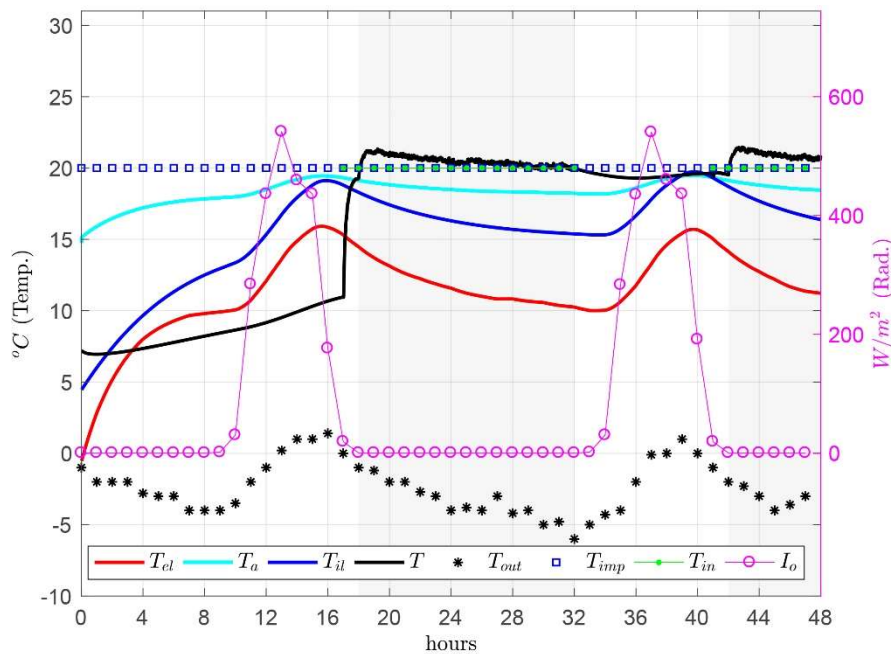


Figura 77. Hipótesis: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Invierno. Datos: temperatura exterior T_{out} , radiación I_o temperatura de flujo de aire en la cámara T_{imp} , temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} y temperaturas calculadas T_{il} , T_a , T_{el} , T a una altura de 1.5 m.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

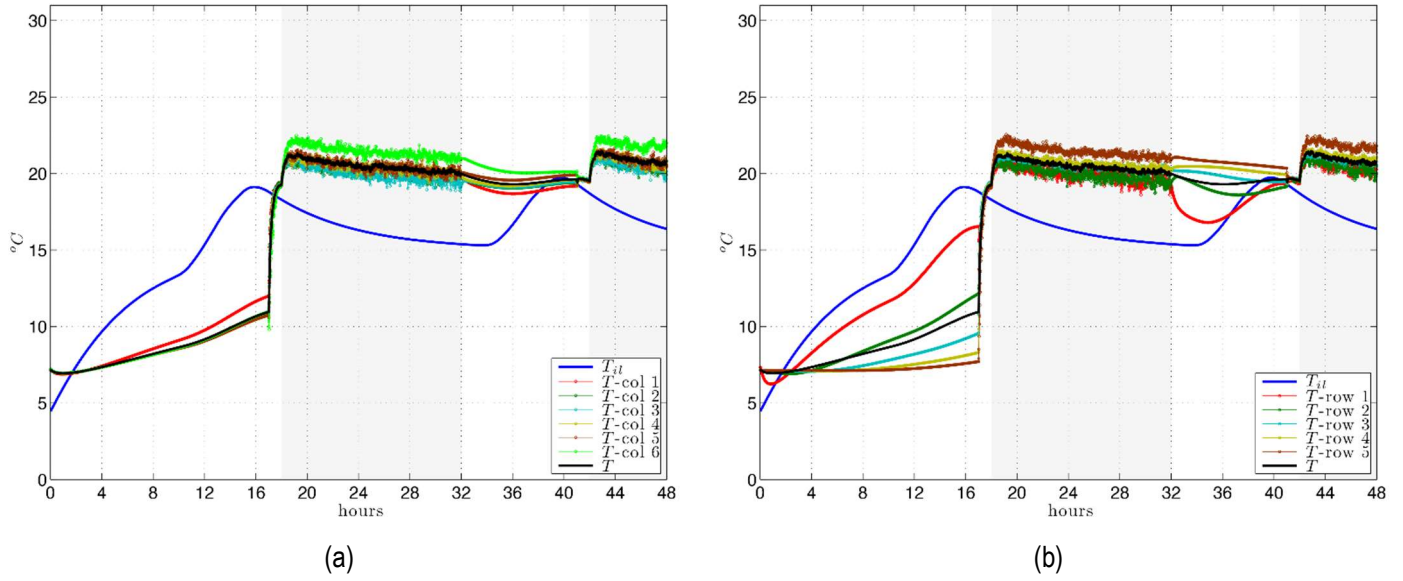


Figura 78. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Invierno. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores calculadas en los puntos estudiados dados en la figura 71: a) en columnas, b) en filas.

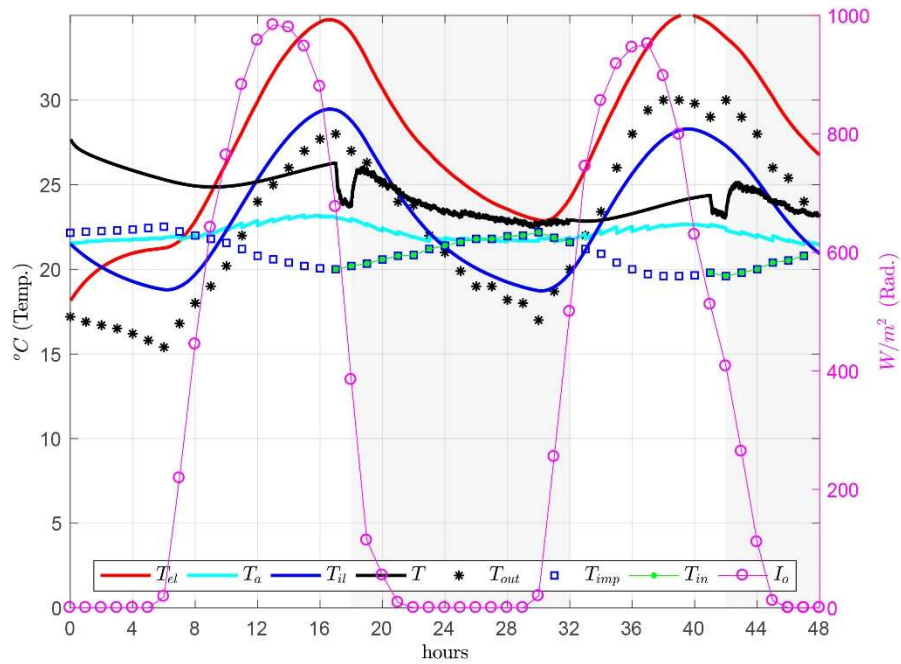


Figure 79. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano sin *free-cooling*. Datos: temperatura exterior T_{out} , radiación I_o , temperatura de flujo de aire en la cámara T_{imp} , temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} y temperaturas T_{il} , T_a , T_{el} , T calculadas a una altura de 1.5 m.

9. Modelo numérico complejo del efecto combinado de una fachada activa transparente de doble piel y un sistema de ventilación mecánica

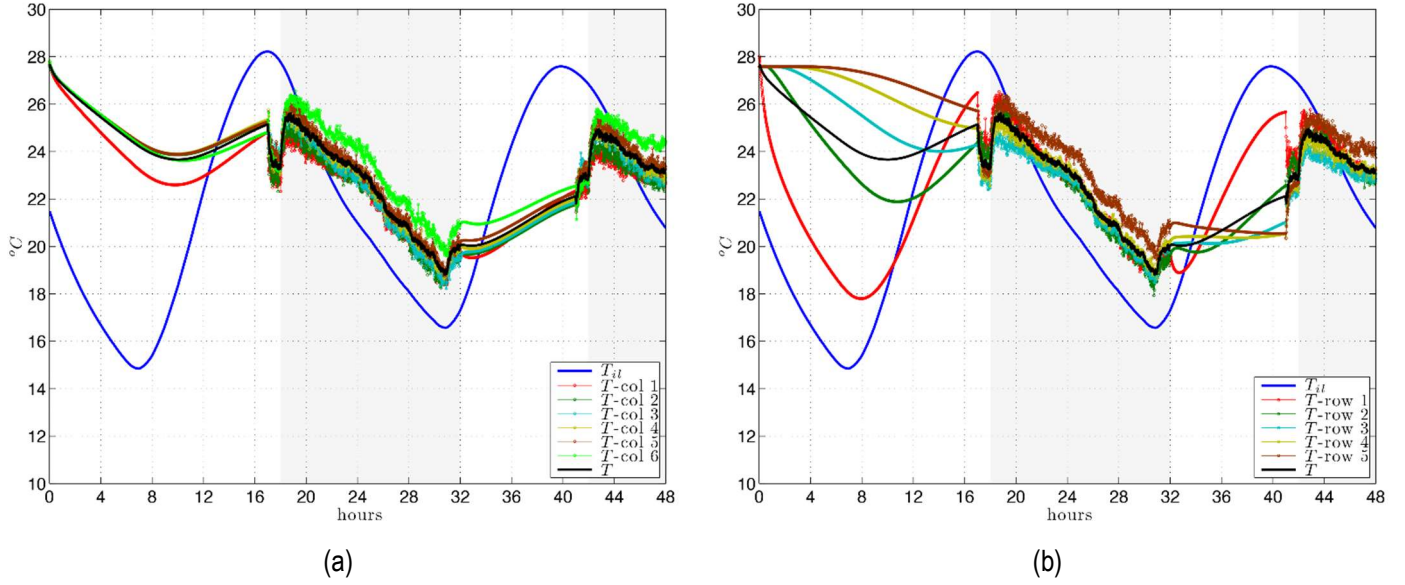


Figura 80. Caso 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano sin *free-cooling*. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores calculadas en los puntos estudiados dados en la figura 71: a) en columnas, b) en filas.

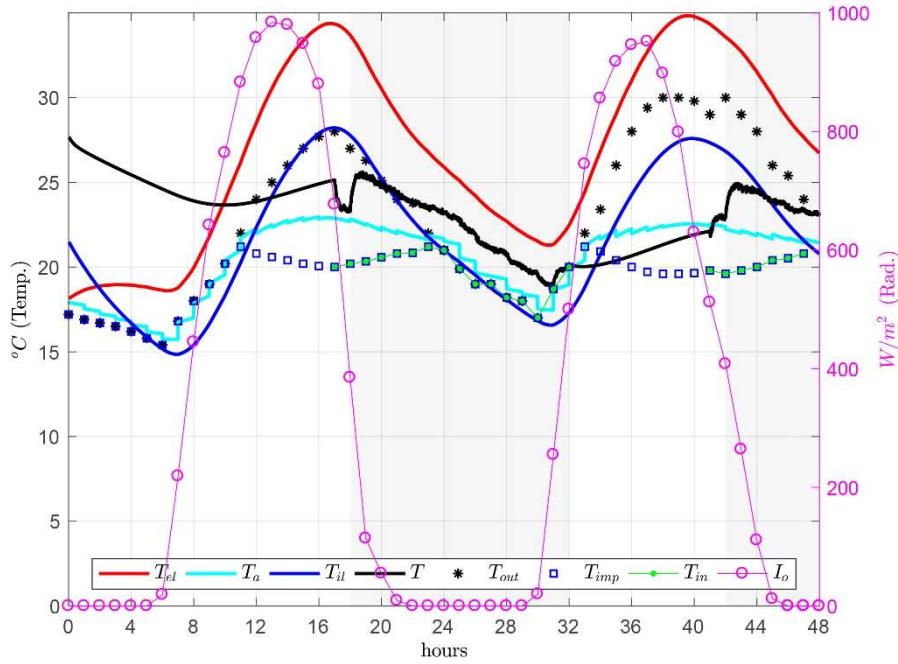


Figura 81. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano con *free cooling*. Datos: temperatura exterior T_{out} , radiación I_o (escalada con un factor de 0.01), temperatura de flujo de aire en la cámara T_{imp} , temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} y temperaturas T_{il} , T_a , T_{el} , T calculadas a una altura de 1.5 m.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

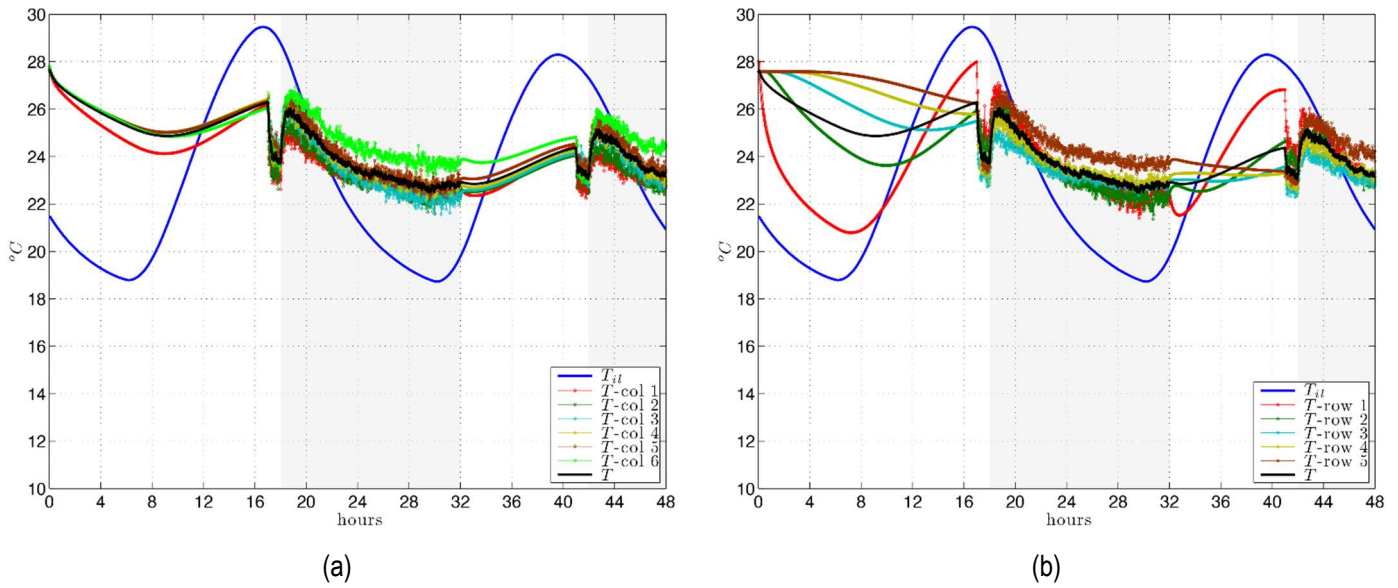


Figura 82. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano con *free-cooling* Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores calculadas en los puntos estudiados dados en la figura 71: a) en columnas, b) en filas.

En resumen, las modificaciones propuestas como alternativas a las de Le Corbusier constituyen una mejora sustancial, tanto en temperaturas interiores promedio como en la distribución de temperaturas dentro de la habitación, en condiciones de invierno y de verano (Fig. 83, capturas de pantalla de los vídeos que se presentan como anexo a esta tesis) y redundan en una sensible mejora de la eficiencia energética del sistema.

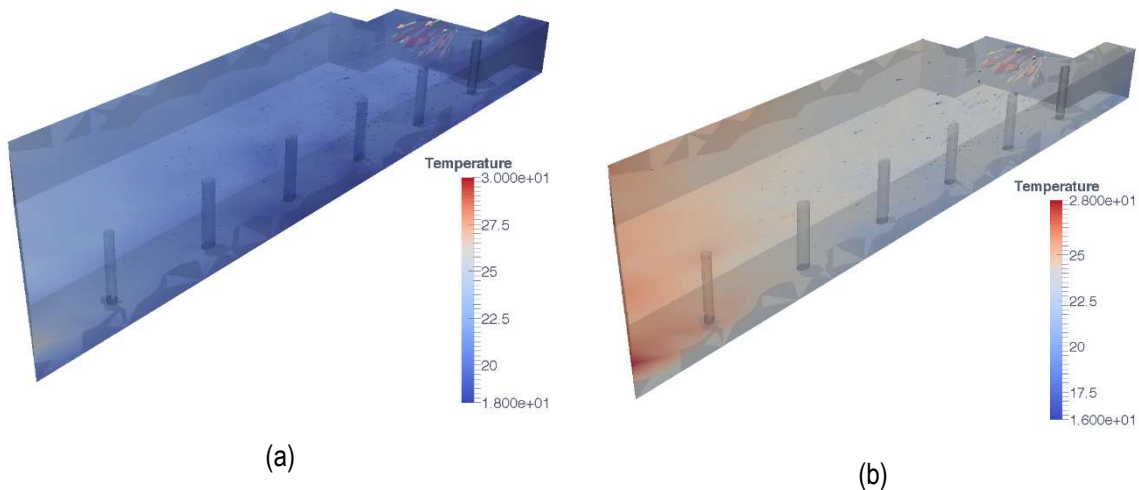


Figura 83. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Imagen 3D de distribución de las temperaturas a las 0:00 horas en el segundo día de cálculo: a) invierno, b) verano sin *free cooling*.

-
- 1 ISO 7730:2005. Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. Available online: <https://www.iso.org/standard/39155.html> (15 November 2017).
 - 2 Liu, W., Jin, M., Chen, Ch., Chen, Q. (2016). Optimization of air supply location, size, and parameters in enclosed environments using a computational fluid dynamics-based adjoint method. *Journal of Building Performance Simulation*, 9, 149–161. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1006525>

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

10. Conclusiones

Le Corbusier innovó la arquitectura del siglo XX, no sólo desde el punto de vista formal, sino también tecnológico. La incorporación de la arquitectura del vidrio conllevaba una nueva y desconocida relación entre arquitectura y energía. Él concibió el control ambiental de los edificios a partir de un planteamiento mecanicista, en la búsqueda del “edificio isotérmico”. La Ciudad del Refugio de París (1929-1933) es una pieza clave en esta nueva concepción ambiental. Para este edificio Le Corbusier propuso una de sus innovaciones tecnológicas más brillantes, con el fin de incluir los sistemas de control ambiental en la arquitectura mediante la combinación de lo que denominó el muro neutralizante y la respiración exacta. Esta vinculación entre arquitectura y acondicionamiento ambiental es quizás el más claro precedente de las actuales preocupaciones ambientales y energéticas asociadas a la edificación.

La reconstrucción de lo acontecido sobre las dificultades que supuso introducir estas innovaciones en la Ciudad del Refugio parisina ha sido un punto de partida fundamental en esta investigación, ya que una de ellas, el muro neutralizante, nunca se ejecutó debido principalmente a restricciones financieras y de desconfianza técnica. Esto impidió conocer el alcance que podría haber tenido esta propuesta como solución de acondicionamiento térmico de edificios asociada al diseño de su envolvente, y si hubiese sido competitiva con la solución dominante para ese acondicionamiento en ese siglo XX: las instalaciones de aire acondicionado. Le Corbusier, con la inestimable ayuda de G. Lyon, propuso una solución adelantada a su tiempo, el muro neutralizante, dotado de una cámara situada entre dos hojas de vidrio, térmicamente activa, pues en ella se pretendía circular aire frío o caliente, dependiendo de la estación del año y de las condiciones climáticas del lugar. Su sistema fue un precursor de lo que hoy se conoce como sistemas de fachadas activas.

El empleo de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), el Método de Elementos Finitos (FEM), la generación de modelos numéricos predictivos basados en los principios de CFD y FEM, así como los actuales programas de simulación ambiental y energética, nos permiten responder a preguntas sobre la idoneidad técnica de estas innovaciones de Le Corbusier, con el fin de superar las desconfianzas que sufrió cuando se propusieron. Pero también dan la oportunidad de ofrecer alternativas de mejora a esas propuestas, principalmente para lograr una mayor eficiencia energética. Esta tesis pretende realizar aportaciones que contribuyan a ello.

Para la presentación de las conclusiones, las expondremos estructuradas en los siguientes apartados:

10.1 Idoneidad de la solución ejecutada: *pan de verre* y respiración exacta.

Mediante el empleo de la Dinámica de Fluidos Computacional, se ha valorado el comportamiento ambiental del sistema ejecutado en la Ciudad del Refugio: la combinación de *pan de verre* y respiración exacta.

Conclusión 1:

Los resultados de los modelos energéticos generados con la disposición de un pan de verre de 7 mm, sin el funcionamiento de la respiración exacta, permiten comprobar la clara dependencia de las condiciones climáticas exteriores en la temperatura interior en el dormitorio colectivo, debido principalmente a la influencia de la radiación solar. Las temperaturas en invierno, en general, se ajustan bien a los valores de confort. Sin embargo, con el aumento de radiación solar en verano unido a la hermeticidad de la solución del *pan de verre* y, en consecuencia, la falta de renovación de aire, se pueden llegar a alcanzar valores de temperatura interior superiores a 30 °C, a pesar de disponerse un sistema de protección solar deslizante interior. Estas temperaturas coinciden con las mediciones realizadas por los técnicos en 1933, después de que los usuarios realizaran quejas a los responsables del edificio, completamente justificadas, cursadas a través de cartas dirigidas a Le Corbusier.

Conclusión 2:

La combinación del *pan de verre* con la respiración exacta mejora sensiblemente la temperatura operativa en el dormitorio, tanto en verano como en invierno, ya que el caudal de ventilación impulsado era previamente tratado térmicamente en condiciones de aire neutro: 20 °C en invierno y 25 °C en verano. No obstante, la influencia de la radiación solar y la debilidad térmica del *pan de verre* impiden que se alcancen valores de temperatura interior en el rango de confort.

10.2 Modelo numérico simplificado: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (2D)

Se ha implementado un modelo numérico propio de esta tesis, mediante el programa CFD de código abierto FreeFem++, con el que se puede predecir el comportamiento térmico que habría generado el muro neutralizante en la Ciudad de Refugio de París, bajo diferentes hipótesis de condiciones ambientales y de funcionamiento, de haber sido finalmente ejecutado como propuso Le Corbusier: dos hojas de vidrio de 7 mm con una cámara activa de aire de 110 mm, impulsando un caudal de 100 l/s por cada metro de longitud de muro neutralizante a una temperatura variable en función de la temperatura exterior. Este modelo ha sido validado con los resultados de las pruebas ejecutadas en cámaras de ensayo, en 1932, por los ingenieros de Saint Gobain en condiciones de invierno.

Conclusión 3:

El empleo individualizado del muro neutralizante, sin la combinación de la respiración exacta, se muestra como una solución idónea como sistema de calefacción y refrigeración. Los resultados de temperatura interior obtenidos de las simulaciones en invierno, impulsando aire en la cámara a temperatura variable en función de la temperatura exterior, entre 21-23 °C, son sensiblemente inferiores a los de confort, disminuyendo con la profundidad de la sala desde la fachada acristalada. En condiciones de verano,

impulsando el aire en la cámara a 15-18 °C, se obtienen temperaturas cercanas a las de confort, aunque la radiación solar supone una menor uniformidad térmica en la sala.

Conclusión 4:

Las condiciones de funcionamiento del muro neutralizante y los valores de temperatura interior obtenidos, tanto en invierno como en verano, confirman que el sistema térmico activo propuesto por Le Corbusier para el control ambiental interior, un sistema de calefacción/refrigeración integrado en la envolvente del edificio, además de eficiente desde un punto de vista energético, permite generar un ambiente térmico uniforme, *isothermique*, con unas condiciones ambientales interiores de confort similares durante todo el año, independientemente de la temperatura exterior y la radiación solar.

Para conocer el efecto combinado del muro neutralizante y de la respiración exacta, se acopla al modelo numérico 1D, que predice el comportamiento del muro neutralizante, con un modelo 2D que considera la distribución de temperaturas en el dormitorio principal.

Conclusión 5:

En los resultados de las simulaciones realizadas con FreeFem++, se observa en la habitación objeto de estudio una temperatura uniforme y unas condiciones climáticas adecuadas para condiciones de invierno y verano. La actividad térmica en el muro neutralizante equilibra la temperatura exterior para producir una temperatura más suave en el vidrio interior y, a su vez, se acerca a las condiciones de confort dentro de la habitación, validándose la propuesta de Le Corbusier para el acondicionamiento ambiental de la Ciudad del Refugio. En invierno, impulsando en el muro neutralizante un caudal de 100 l/s por cada metro lineal en la cámara intermedia a una temperatura constante: 30 °C (+10 °C respecto la temperatura interior de confort), e impulsando 300 m³/h de aire de la ventilación en la habitación a 20 °C, la temperatura media de la habitación es de 23.5 °C. En verano, manteniendo en el muro neutralizante el caudal de 100 l/s por cada metro lineal, pero modificando su temperatura a 15 °C (-10 °C respecto de la temperatura interior de confort), e impulsando 1050 m³/h de aire de la ventilación en la habitación a 25 °C, la temperatura media interior se eleva a 26.5 °C.

10.3 Modelo numérico complejo: combinación del muro neutralizante (1D) y respiración exacta (3D). Optimización energética.

Finalmente, el modelo anterior se desarrolla manteniendo las formulaciones de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y empleando el Método de Elementos Finitos (FEM), programado en código abierto mediante el software FreeFEM3D. Se ha considerado la distribución de temperaturas en el dormitorio principal como un problema tridimensional (3D), manteniéndose la simulación del muro neutralizante como un problema unidimensional (1D). Además, este nuevo modelo permite modificar los parámetros de diseño establecidos por Le Corbusier y G. Lyon tras los ensayos realizados por los ingenieros de Saint Gobain, y,

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

por tanto, permite optimizar la solución original planteada, a la vez que se puede aplicar a cualquier fachada considerada con *Active Transparent Façade* (ATF). La mejora sustancial del modelo permite simular con mayor precisión las condiciones de circulación del aire en el interior de la sala, notablemente influida por los pilares circulares existentes.

Conclusión 6:

En invierno, manteniendo las mismas condiciones de temperatura e impulsión en el muro neutralizante y respiración exacta del modelo anterior, en condiciones de sala ocupada, se obtienen unas temperaturas interiores medias uniformes entre 26–28 °C, superiores al rango de confort, lo que supone un exceso de consumo energético. En verano, las temperaturas interiores medias presentan una mayor oscilación, entre 16-25 °C, debido a la oscilación térmica de la temperatura exterior, con valores claramente inferiores a los de confort, debido a una impulsión de aire excesivamente frío en la cámara del muro neutralizante, con el consiguiente exceso de consumo energético. En consecuencia, el sistema de acondicionamiento ambiental propuesto por Le Corbusier, mediante la combinación del muro neutralizante y la respiración exacta, contrarresta la influencia de las condiciones exteriores, aunque a costa de un cierto exceso de consumo de energía, pudiendo haber sido una alternativa a los sistemas de aire acondicionado que se desarrollaban simultáneamente en Estados Unidos.

El modelo matemático 3D propuesto permite plantear la mejora sustancial de la solución propuesta por Le Corbusier para alcanzar las condiciones de confort en el dormitorio principal, aumentando la eficiencia energética de ambos sistemas, actuando de forma combinada, tanto en verano como en invierno, principalmente mediante el control de la temperatura del aire impulsado en la cámara de la ATF y del flujo de aire en la habitación desde el sistema de ventilación mecánica, a la vez que en condiciones de verano se considera la posibilidad de utilizar *free-cooling*, tanto para la ventilación como para la impulsión de aire en la cámara de la ATF.

Conclusión 7:

Dado el clima parisino, en los días de invierno con bajas temperaturas exteriores, calentando el flujo de aire para suministrarlo a una temperatura constante de solo 20 °C, tanto en la cámara activa como en la habitación a través del sistema de ventilación mecánica, se obtienen en la sala de estudio unas temperaturas medias muy estables: alrededor de 20-21 °C, a 1.5 m de altura. En los días más calurosos de verano, también se obtiene confort térmico, enfriando ligeramente el flujo de aire para suministrarlo, tanto en la cámara intermedia como en la habitación, a una temperatura 4 °C más alta que la propuesta por Lyon, añadiendo la condición de no superar la temperatura exterior (condiciones de *free-cooling*). Las temperaturas medias interiores son menos estables que en invierno, entre 19 °C y 26 °C a una altura de 1.5 m, pero con una significativa reducción de la demanda respecto de la solución propuesta por Le Corbusier.

En suma, en esta tesis se verifica el cumplimiento de la hipótesis formulada: resulta posible generar modelos numéricos para evaluar el comportamiento térmico de soluciones de fachadas activas como las propuestas por Le Corbusier con el muro neutralizante, incluso actuando de forma combinada con sistemas de ventilación mecánica instalados para el control de la calidad de aire interior. Se consideran alcanzados tanto el objetivo general como los objetivos específicos formulados.

Al mismo tiempo se constata que la propuesta combinada de Le Corbusier del muro neutralizante y ventilación exacta, como técnica de control ambiental asociada a la construcción del espacio habitable, puede llegar a garantizar unas adecuadas condiciones de confort y uniformidad térmica, aunque puede ser optimizada fundamentalmente para mejorar su eficiencia energética, adelantándose unos 50 años a los denominados sistemas de fachada activa.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Epílogo

Hasta el momento, las soluciones de ATF no han llegado a ser una alternativa competitiva con los sistemas de climatización aún dominantes en los edificios terciarios. Estos sistemas no dejan de ser consecuencia de la superposición de tecnología industrial, más o menos integrada, a la Arquitectura, mientras que las ATF son soluciones que están asociadas a la envolvente de esos edificios terciarios y, por tanto, ya de por sí integradas. De ahí el interés que deben merecer desde un punto de vista de la investigación en Arquitectura. Pero hay que contribuir a despejar las dudas técnicas y, sobre todo, económicas que fueron las principales causas del desistimiento en su día de las propuestas de Le Corbusier y que todavía, aunque en menor grado, persisten.

Una vez verificada en esta tesis doctoral la idoneidad de estas ATF como soluciones para el acondicionamiento ambiental de edificios, y la potencialidad que actualmente tienen los modelos numéricos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Método de Elementos Finitos (FEM) para predecir el comportamiento térmico de edificios cuya envolvente incluyen soluciones de este tipo, la investigación debiera proseguir analizando y cuantificando la eficiencia energética de estas soluciones y la repercusión que eso supone en los costes de explotación a lo largo de la vida del edificio, con el fin de plantear en toda su extensión el problema de la viabilidad económica de esta solución y su potencial competitividad. Se abre, pues, una apasionante línea de trabajo que da continuidad al trabajo desarrollado en esta tesis doctoral.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Bibliografía

Libros y capítulos de libro

- Abitare. (1960). Abitare: Interior design, architecture, art. *Abitare Segesta*, 292.
- Banham, R. (1969). *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. Architectural Press: London, UK.
- Boesiger, W. (1999). *Le Corbusier et Pierre Jeanneret: oeuvre complete. Vol 2, 1929-1934*. Basel, Suiza: Birkhauser.
- Bryan, H. (1991). *Le Corbusier and the "Mur Neutralisant: An Early Experiment in Double Envelope Construction*. Proceedings of the Ninth International PLEA Conference. pp. 257-62.
- Clichés R. Lévy. (1934) Cite de Refuge de l'Armée du Salut, rue Cantagrel et rue du Chevaleret, a Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Architecte*. Aug. p.44
- Cohen, J. L. (2004). *Le Corbusier, 1887-1965: The Lyricism of Architecture in the Machine Age*. London: Taschen.
- Colquhoun, A. (1987). The strategies of the Grands Travaux. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Assemblage, 4, 66-81.
- Cooper, G. (1998). *Air-Conditioning America: Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960*. Johns Hopkins Univ. Press.
- Cuadernos de Postgrado. (1930). *La respuesta de la American Blower Corporation*, 24 de enero.
- Fernández Galiano, L. (2000). *Fire and Memory: On Architecture and Energy*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Frampton, K. (2002). *Le Corbusier: Architect of the Twentieth Century*. New York: Harry N. Abrams.
- James Inglis, D. (1988). Le Corbusier's test-bed: Le Corbusier: the City of Refuge, Paris 1929-33, by Brian Brace Taylor, with introduction by Kenneth Frampton [book review].
- Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grève à travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Revista Glaces et Verres*, 20, 12-18.
- Le Corbusier. (1928). *Plan pour l'édification du bâtiment du Centrosoyus de Moscou*. Juillet. 6. FLC H2-9-15.
- Le Corbusier. (1946). *Towards a New Architecture*. London: Architectural Press.
- Le Corbusier. (1947). *When the cathedrals were white: a journey to the country of timid people*. New York: Cornwall Press.
- Le Corbusier. (1983). *Armée du Salut, Cité de Refuge*. New York: Garland Publishing.
- Lemoine, B. (1987). Le Corbusier dans L'Architecture d'Aujourd'hui. *Architecture d'Aujourd'hui* n° 9-45.
- René Lévy. Cl. (1934). Cité de refuge de l'armée du salut, rue Cantagrel et rue deu Chevaleret, à Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals*. *Architecte*, August, 43-44, 81-84.
- Robertson, H. (1934). The Salvation Army Cité-Refuge, Paris, architects Le Corbusier & Jeanneret. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Architect and building news, Vol.137, 2, 165-169.
- Sáenz de Oíza, F.J. (1987). Entrevista a Francisco Sáez de Oiza. *Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid*. 264-265.
- Sert, J.L, Tieleman, M. (2009). *Le Corbusier, 1887-1965. Correspondance 1928-1965*. Paris: Éditions du Linteau.
- Slessor, C. (1997). *Eco-Tech: Sustainable Architecture and High Technology*. London: Thames and Hudson Ltd.

- Still, M.F.R. (1930). *Carta al vicepresidente de American Blower Corporation*. 3 de enero.
- Taylor, B.B. (1979). *La Cité de refuge di Le Corbusier, 1929/33*. Roma: Officina Edizioni.
- Taylor, B.B. (1981). Restoration is not salvation: Cité de Refuge, Paris. *Avery Index to Architectural Periodicals*. Progressive architecture, Nov., v.62, n.11, 116-119.
- Taylor, B.B. (1987). *Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. The University of Chicago Press.
- Torres Cueco, J. (2004). *Le Corbusier: visiones de la técnica en cinco tiempos*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos.
- Urbano, R. (2007-2009). *The role of Le Corbusier environmental control proposals in the evolution of the glass facade. About Le Mur neutralizant & other strategies*. Paris: Foundation Le Corbusier Research Fellowship.

Artículos científicos

- Barbosa, S., Ip, K. (2014). Perspectives of double-skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1019–1029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.192>
- Chen, Y.H., Sa, S., Zhou, Y., Wei, S.X., Zhiheng, T. (2006). A mathematical model of thermal channel glazing curtain wall. *Building Energy & Environment*, 25, 10–15.
- Fallahi, A., Haghighat, F., Elsadi, H. (2010). Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. *Energy and Buildings*, 42, 1499–1509. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.020>
- Flores Larsen, S., Rengifo, L., Filippin, C. (2015). Double skin glazed façades in sunny Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 102, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.019>
- Fuliotto, R., Cambuli, F., Mandas, N., Bacchin, N., Manara, G., Chen Q. (2010). Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade. *Energy and Buildings*, 42, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.006>
- Gelesz, A., Reith, A. (2015). Climate-based performance evaluation of double skin facades by building energy modelling in central Europe. *Energy Procedia*, 78, 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.735>
- Ghadimi, M., Ghadamian, H., Hamidi, A.A., Shakouri, M., Ghahremanian, S. (2013). Numerical analysis and parametric study of the thermal behavior in multiple-skin facades. *Energy and Buildings*, 67, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.014>
- Gratia, E., de Herde, A. (2004). Optimal operation of a south double-skin façade. *Energy and Buildings*, 36, 41–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.06.001>
- Gratia, E., De Herde, A. (2007). The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. *Energy and Buildings*, 39, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.001>
- Guardo, A., Coussirat, M., Egusquiza, E., Alavedra, P., Castilla, R. (2009). A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 41, 534–542. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.019>
- Hazem, A., Ameghchouche, M., Bougriou, C. (2015). A numerical analysis of the air ventilation management and assessment of the behavior of double skin facades. *Energy and Buildings*, 102, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.057>
- Hien, W.N., Liping, W., Chandra, A.N., Pandey, A.R., Xiaolin, W. (2005). Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. *Energy and Buildings*, 37, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.004>

- Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2003). Modeling and simulation of a simple glass window. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80, 355–374. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.08.010>
- Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2005). Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.022>
- Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. (2006). Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, 26, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.023>
- Joe, J., Choi, W., Kwak, Y., Huh, J.-H. (2014). Optimal design of a multi-story double skin façade. *Energy and Buildings*, 76 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.002>
- Kim, D.W., Park, C.S. (2012). Corrigendum to “Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus”. *Energy and Buildings*, 49, 647. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.004>
- Kim, D.W., Park, C.S. (2012). Corrigendum to “Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus”. *Energy and Buildings*, 49, 647. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>
- Liu, M., Bjarne Wittchen, K., Kvols Heiselberg, P., Vildbrad Winther, F. (2014). Development and sensitivity study of a simplified and dynamic method for double glazing façade and verified by a full-scale façade element. *Energy and Buildings*, 68, 432–443. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.056>
- Liu, W., Jin, M., Chen, Ch., Chen, Q. (2016). Optimization of air supply location, size, and parameters in enclosed environments using a computational fluid dynamics-based adjoint method. *Journal of Building Performance Simulation*, 9, 149–161. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1006525>
- Manz, H., Schaelin, A., Simmler, H. (2004). Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double facades. *Building Environmental*, 39, 1023–1033. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.003>
- Pappas, A., Zhai, Z. (2008). Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy Driven airflow. *Energy and Buildings*, 40, 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.002>
- Peng, L., Nielsen, P.V., Wang, X., Sadrizadeh S., Liu L., Li, Y. (2016). Possible user-dependent CFD predictions of transitional flow in building ventilation. *Building and Environment*, 99, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.014>
- Shameri, M.A., Alghoul, M.A., Sopian, K., Fauzi M. Zain, M., Elayeb, O. (2011). Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1468–1475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.016>
- Zhou, J., Chen, Y. (2010). A review on applying ventilated double-skin façade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1321–1328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.017>

Tesis doctorales

- Requena Ruiz, I. (2011). *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)*. Tesis. Universidad de Alicante. Escuela Politécnica Superior.
- Torres Cuelco, J. (2010). *Le Corbusier, Arquitectura y Técnica: El Centrosoyus de Moscú, 1928-1936*. Cuadernos de Pos-Grado en Arquitectura y Urbanismo. 69-92.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Textos normativos

ISO 7730:2005. Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. Available online: <https://www.iso.org/standard/39155.html> (15 November 2017).

Páginas web

DesignBuilder. Disponible en: <http://www.designbuilder.es/descargas/software-designbuilder> (17 Junio 2016).

FreeFem++ v.-3.20. Disponible en: <http://www.FreeFem.org/ff++/> (30 Octubre 2016).

FreeFEM3D. Disponible en: <http://www.freefem.org/ff3d/> (25 Julio 2017).

Fundación Le Corbusier. Disponible en: <http://www.fondationlecorbusier.fr> (2 Diciembre 2015).

Saint Gobain, Disponible en: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/SP/index.asp?nav1=AU&nav2=AUSM/> (13 Septiembre 2014).

Urbano, R. (2007-2009). *About Le Mur Neutralisant & other strategies. The role of Le Corbusier environmental control proposals in the evolution of the glass facade*. Paris: Foundation Le Corbusier Research Fellowship. Disponible en: <http://www.rosaurbano.com/research/lecorbusier/lecorbusier.html> (30 Enero 2015).

Lista de figuras

Figura 1. Vista axonométrica de la Ciudad del Refugio tal como se construyó.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figura 127. Dibujado por: H. Lapprand.

Figura 2. Funcionamiento del muro neutralizante

Fuente: González, 2006 p.69. Autor: Le Corbusier, 1928.

Figura 3. Vista del ventanal desde el interior de la casa tipo Citrohan. Stuttgart 1926.

Fuente: FLC 7651

Figura 4. Detalle constructivo del doble acristalamiento de la casa tipo Citrohan. Stuttgart 1926.

Fuente: FLC 7641

Figura 5. Esquema de funcionamiento de la respiración exacta y muro neutralizante.

Fuente: FLC 15720

Figura 6. Esquema de Le Corbusier: El edificio hermético.

Fuente: Croquis de Précisions.

Figura 7. Planta de trazado de conductos para el Edificio Liga de las Naciones. Ginebra 1927.

Fuente: FLC 23178

Figura 8. Sección de trazado de conductos para el Edificio Liga de las Naciones. Ginebra 1927.

Fuente: FLC 23189

Figura 9. Axonometría del funcionamiento del muro neutralizante y la respiración exacta del edificio Centrosyous. Moscú 1928.

Fuente: FLC 15690

Figura 10. Axonometría del funcionamiento del muro neutralizante y la respiración exacta del edificio Swiss Rentenanstalt. Zurich 1933.

Fuente: FLC 15720. nº RA 3215

Figura 11. Ciudad del Refugio 1930.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 166.

Figura 12. Barge Louis Catherine 1929.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 16.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Figura 13. Palais du People 1926.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 12.

Figura 14. *Roomettes*. 1954.

Fuente:

<http://viewpictures.co.uk/Details.aspx?ID=131668&TypeID=1&searchtype=simple&contributor=0&licenses=1&sort=REL&cdonly=False&mronly=False>

Figura 15. Características de la parcela y de la edificación.

Fuente: FLC 10614. nº CR 2502.

Figura 16. Planta sótano.

Fuente: FLC 30845. nº CR 2606.

Figura 17. Planta *pilotis*.

Fuente: FLC 30841. nº CR 3142.

Figura 18. Planta baja.

Fuente: FLC 30844. nº CR 3143.

Figura 19. Vestíbulo de entrada a la Ciudad del Refugio.

Fuente: Clichés R. Lévy. (1934) *Cite de Refuge de l'Armée du Salut, rue Cantagrel et rue du Chevaleret*, a Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Architecte*. Aug. p.44.

Figura 20. Pasarela de comunicación entre vestíbulo y rotonda de ingreso a la Ciudad del Refugio.1930.

Fuente: Clichés R. Lévy. (1934) *Cite de Refuge de l'Armée du Salut, rue Cantagrel et rue du Chevaleret*, a Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Architecte*. Aug. p.44.

Figura 21. Planta primera.

Fuente: FLC 30842. nº CR 3144

Figura 22. Planta segunda.

Fuente: FLC 1072. nº CR 3170.

Figura 23. Planta tercera y cuarta.

Fuente: FLC 10854. nº CR 3145.

Figura 24. Planta quinta.

Fuente: FLC 10854. nº CR 3145.

Figura 25. Planta sexta.

Fuente: FLC 10872. nº CR 3170.

Figura 26. Planta séptima.

Fuente: FLC 10858. nº CR 3146.

Figura 27. Planta octava.

Fuente: FLC 10858. nº CR 3146.

Figura 28. Sección vertical por muro neutralizante. Ciudad del Refugio. París 1930.

Fuente: FLC 22937.

Figura 29. Secciones horizontales por el muro neutralizante. Ciudad del Refugio. París 1930.

Fuente: FLC 22877, FLC 22876 y FLC 22895.

Figura 30. Perspectiva de la fachada ejecutada con *pan de verre*. 1931.

Fuente: Clichés R. Lévy. (1934) Cite de Refuge de l'Armée du Salut, rue Cantagrel et rue du Chevaleret, a Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Architecte*. Aug. p.43.

Figura 31. Vista desde el exterior de las persianas interiores.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 153.

Figura 32. Sección. Ensayo Saint Gobain. 1932.

Fuente: Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grèveâ travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Glaces et Verres*, 20. p.13.

Figura 33. Planta. Ensayo Saint Gobain. 1932.

Fuente: Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grèveâ travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Glaces et Verres*, 20. p.13.

Figura 34. Resultados de los vidrios ensayados por Saint Gobain. 1931.

Fuente: Le Braz, J. (1933). La transmission de la chaleur grèveâ travers le verre: Des idées nouvelles sur le chauffage des habitations. *Glaces et Verres*, 20. p.15.

Figura 35. Propuesta de Le Corbusier para la sala de calefacción. 1933.

Fuente: FLC 11339.

Figura 36. Propuesta de Le Corbusier para la sala de refrigeración. 1933.

Fuente: FLC 10983.

Figura 37. Habitación de gran ocupación destinada a los hombres.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 117.

Figura 38. Fachada antes de la II GM. 1933.

Fuente: Clichés R. Lévy. (1934) Cite de Refuge de l'Armée du Salut, rue Cantagrel et rue du Chevaleret, a Paris: architectes Le Corbusier et P. Jeanneret. *Architecte*. Aug. p.43.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Figura 39. Fachada después de la II GM. 1944.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 119.

Figura 40. Fachada este sin brise-soleil. 1954.

Fuente: http://stock.archivision.com/Europe/France-1/6319493_rd77S3/424656044_akQ5o#li=424658890&k=hebom

Figura 41. Fachada sur con brise-soleil. 1954.

Fuente: http://stock.archivision.com/Europe/France-1/6319493_rd77S3/424656044_akQ5o#li=424656044&k=akQ5o

Figura 42. Planta primera de la Ciudad del Refugio.

Fuente: Elaboración propia a partir de FLC 30842. n° CR 3144

Figura 43. Diagrama de operación del modelo acoplado de los problemas 1D y 2D.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Determinación de fronteras dentro del dominio de la habitación de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa FreeFem++.

Figura 45. Fenómenos físicos en el muro neutralizante.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Factor de forma entre los dos paneles de vidrio del muro neutralizante.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Modelado de habitación y fachada activa, ATF. Etiquetas de contornos para el problema (P_{room}) y detalle de la malla computacional.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa FreeFEM3D.

Figura 48. Habitación y vectores de velocidad coloreados y escalados en función de la norma de la velocidad máxima de entrada para el caso estudiado.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa FreeFEM3D.

Figura 49. Vista del exterior de la fachada ejecutada con *pan de verre*. 1931.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 146.

Figura 50. Vista del interior del sistema de protección solar incorporado al *pan de verre* antes de su reforma.

Fuente: Taylor, B.B. (1987). *Le Corbusier, the city of refuge, Paris 1929-33*. Chicago: University of Chicago Press. Figure 164.

Figura 51. Simulación energética usando CFD. Habitación de estudio con *muro neutralizante* y *respiración exacta* para un día desfavorable de invierno.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figure 52. Simulación energética usando CFD. Habitación de estudio con muro neutralizante y respiración exacta para un día desfavorable de verano.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 53. Habitación de ensayo Saint Gobain. Dimensiones y puntos de medición del modelo CFD.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 54. Modelo de la habitación de ensayo Saint Gobain. Densidad de mallado para el cálculo CFD de FreeFem++.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 55. Resultados de la simulación CFD en intervalo horario con sistema de calefacción (sección horizontal del modelo).

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 56. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y sin radiación solar: día 30 de diciembre, 8:00 h.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 57. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y sin radiación solar: día 30 de diciembre, 15:00 h.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 58. Evolución de la temperatura interior en diferentes puntos de la habitación para el 30 de diciembre, sin radiación solar, con caudal de impulsión $q=100$ l/s y temperatura de impulsión da la cámara activa variable.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 59. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y radiación solar: 30 de diciembre, 8:00 h.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 60. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y radiación solar: día 30 de diciembre, 15:00 h.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 61. Evolución de la temperatura interior en diferentes puntos de la habitación para el 30 de diciembre, con radiación solar, con caudal de impulsión $q=100$ l/s y temperatura de impulsión variable en la cámara activa.

Fuente: Elaboración propia.

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

Figura 62. Resultados de la simulación CFD (sección horizontal del modelo) con calentamiento de aire y radiación solar: 2 de julio, 15:00 h.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 63. Evolución de la temperatura interior en diferentes puntos de la habitación para el 2 de julio, con radiación solar, con caudal de impulsión $q=100$ l/s y temperatura de impulsión da la cámara activa variable.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 64. Ganancia total de calor en el muro neutralizante durante dos días de estudio: (a) 30 de Diciembre, (b) 15 de Agosto.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 65. Evolución de la temperatura del vidrio interior durante dos días de estudio: (a) 30 de Diciembre, (b) 15 de Agosto.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 66. Simulación a la altura media del muro neutralizante el 30 de Diciembre después de las 25 horas (con temperatura de la respiración exacta a 20 °C y temperatura del muro neutralizante a 30 °C: (a) Con ocupación, (b) Sin ocupación.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 67. Simulación a la altura media del muro neutralizante el 15 de Agosto después de las 25 horas (con temperatura de la respiración exacta a 25 °C y temperatura del muro neutralizante a 15 °C: (a) Con ocupación, (b) Sin ocupación.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 68. Comparación de la temperatura interior de la habitación con y sin cargas de ocupación: (a) 15 de Agosto, (b) 30 de Diciembre.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 69. Puntos de medida de la temperatura interior (*) marcados en rojo.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 70. Modelado de habitación y fachada activa, ATF. Etiquetas de contornos para el problema (P_{room}).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 71. Puntos de medida de la temperatura interior (*) marcados en rojo.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 72. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Invierno. Datos: temperaturas calculadas: T_{el} , T_a , T_{il} , T a una altura de 1.5 m, temperatura exterior T_{out} , temperatura de impulsión T_{imp} , temperatura interior T , todos en el eje Y izquierdo, y radiación I_o en el eje Y derecho.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 73. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Invierno. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores en los puntos dados en la figura 71: (a) por columnas; (b) por filas.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 74. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Verano. Datos: temperaturas calculadas: T_{el} , T_a , T_{il} , T a una altura de 1.5m, temperatura exterior T_{out} , temperatura de impulsión T_{imp} , temperatura interior T , todos en el eje Y izquierdo, y radiación I_o en el eje Y derecho.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 75. Caso 1: Hipótesis de Le Corbusier. Verano. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores en los puntos dados en la figura 71: (a) por columnas; (b) por filas.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 76. Hipótesis 1: Propuesta de Le Corbusier. Imagen 3D de la distribución de la temperatura a las 00:00 horas en el segundo día de cálculo: a) invierno, b) verano.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Figura 77. Hipótesis: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Invierno. Datos: temperatura exterior T_{out} , radiación I_o temperatura de flujo de aire en la cámara T_{imp} , temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} y temperaturas calculadas T_{il} , T_a , T_{el} , T a una altura de 1.5 m.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 78. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Invierno. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores calculadas en los puntos estudiados dados en la figura 71: a) en columnas, b) en filas.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 79. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano sin *free-cooling*. Datos: temperatura exterior T_{out} , radiación I_o , temperatura de flujo de aire en la cámara T_{imp} , temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} y temperaturas T_{il} , T_a , T_{el} , T calculadas a una altura de 1.5 m.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 80. Caso 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano sin *free-cooling*. Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores calculadas en los puntos estudiados dados en la figura 71: a) en columnas, b) en filas.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 81. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano con *free cooling*. Datos: temperatura exterior T_{out} , radiación I_o (escalada con un factor de 0.01), temperatura de flujo de aire

Modelos numéricos de evaluación de las soluciones de Le Corbusier para el acondicionamiento térmico de edificios: el muro neutralizante y la respiración exacta. El caso de la Ciudad del Refugio de París.

en la cámara T_{imp} , temperatura de entrada del sistema de ventilación T_{in} y temperaturas T_{il} , T_a , T_{el} , T calculadas a una altura de 1.5 m.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 82. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Verano con *free-cooling* Temperatura del vidrio interior T_{il} y temperatura promedio de la habitación T junto con las temperaturas interiores calculadas en los puntos estudiados dados en la figura 71: a) en columnas, b) en filas.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 83. Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente. Imagen 3D de distribución de las temperaturas a las 0:00 horas en el segundo día de cálculo: a) invierno, b) verano sin *free cooling*.

Fuente: Elaboración propia a partir del software FreeFem++ (v.-3.20).

Listado de tablas

Tabla 1. Nomenclaturas en el problema ($P_{façade}$).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Datos iniciales para los problemas (P_{room}) y ($P_{façade}$).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Propiedades de los vidrios.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Parámetros de diseño para la Hipótesis 1: Propuesta de Le Corbusier.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Parámetros de diseño para la Hipótesis 2: Propuesta alternativa más eficiente energéticamente.

Fuente: Elaboración propia.